В. К. РАЧКОВ

ЧУДЕСНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

Автор брошюры рассказывает о том, как было открыто пьезоэлектричество, какова физическая сущность этого явления, какими свойствами обладают пьезокристаллы.

В брошюре говорится об устройстве пьезоэлектрических приборов и их применении в различных областях науки и техники. Особое внимание уделено применению этих приборов в военном деле

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

- ○
  ○
  ○ В МИРЕ КРИСТАЛЛОВ
  ○ ОТКРЫТИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВА
  ○ ПЬЕЗОКРИСТАЛЛЫ
  ○ ПУТЕВКА В ЖИЗНЬ
  ○ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
  ○ ШУМОПЕЛЕНГАТОРЫ
  ○ ГИДРОЛОКАТОР СЕГОДНЯ
  ○ ПОДВОДНАЯ СВЯЗЬ
  ○ РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ БУИ
  ○ ГОВОРЯЩИЙ КРИСТАЛЛ
  ○ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХОЛОТ
  ○ ЕЩЕ ОДНО ЧУДЕСНОЕ СВОЙСТВО
  ○ САМОЕ ТОЧНОЕ ВРЕМЯ
  ○ ТВОРЧЕСКОЕ СОДРУЖЕСТВО
  ○ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МИКРОСКОП
  ○ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ
  ○ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВО В МЕДИЦИНЕ
  ○ НОВЫЕ УСПЕХИ

В. К. РАЧКОВ

ЧУДЕСНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР
МОСКВА — 1962

В. К. Рачков
ЧУДЕСНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

ВВЕДЕНИЕ

Пьезоэлектричество было обнаружено более 80 лет назад. Однако лишь в 20—30-х годах нашего столетия началось его бурное внедрение в науку и технику. В настоящее время трудно назвать отрасль народного хозяйства, военного дела и промышленности, в которой бы не использовались пьезоэлектрические приборы, являющиеся составной частью многих радиоэлектронных устройств.

XXII съезд Коммунистической партии Советского Союза, подводя итоги колоссальным достижениям советских людей во всех областях жизни, определил широкие перспективы в развитии науки и техники и в частности радиоэлектроники.

Уже сейчас пьезоэлектрические приборы нашли широкое признание у инженеров, летчиков, космонавтов, моряков, металлургов и других специалистов.

Как врач выслушивает сердце человека, так и с помощью пьезоэлектричества люди выслушивают автомобильный мотор и мощную паровую турбину. Без пьезоэлектрических приборов нельзя было бы выявить в неправильно рассчитанных деталях самолетов и ракет опасные шумы, которые могут привести к разрушению корпуса.

Можно ли предупредить столкновение корабля со скалами и айсбергами, с минами и заграждениями? Можно ли измерить глубину моря, чтобы предохранить корабль от опасной посадки на мель? Да, можно. И делают это пьезоэлектрические приборы. С их помощью военные моряки обнаруживают и уничтожают вражеские подводные лодки, а ученые изучают рельеф морского дна. Эти приборы позволяют обнаруживать в море и косяки рыб, чем оказывают неоценимую услугу нашей рыбной промышленности.

Пьезоэлектричество позволяет человеку незримо присутствовать в месте взрыва бомбы и снаряда, в центре землетрясения. Впервые человек получил возможность заглянуть в такие казалось бы недоступные места, как ствол артиллерийского орудия или винтовки в момент выстрела.

Пьезоэлектричество прочно вошло и в наш быт. Так, мы часто слушаем радио, смотрим телевизионные передачи. А ведь в радиовещании и телевидении широко используются

пьезоэлектрические приборы.

Мы часто проверяем свои часы по сигналам точного времени. И здесь пьезоэлектричество не забыто — самые точные часы, по которым даются радиосигналы точного времени, используют это интереснейшее явление природы.

Что же такое пьезоэлектричество? Как люди открыли и научились использовать это явление?

Слово «пьезоэлектричество» в переводе означает электричество, возникающее от давления (от греческого слова «пьезо» — давить). Но этим свойством обладает не всякое вещество, а лишь некоторые кристаллические тела, получившие название пьезокристаллов.

Поэтому *пьезоэлектричество* — это электричество, возникающее в результате механического давления на пьезокристаллы. Следовательно, чтобы понять явление пьезоэлектричества, нужно знать не только законы электричества, но и основные свойства и особенности кристаллов.

ЦЕЙЛОНСКИЙ МАГНИТ

Человечеству давно известны электрические свойства некоторых веществ. Еще древним грекам, жившим за несколько веков до нашей эры, была известна таинственная притягательная сила, возникающая в янтаре при его натирании. Своим названием электричество и обязано янтарю, поскольку это слово происходит от слова «электрон», что по-гречески означает «янтарь».

Электрические свойства кристаллов, и в частности кристаллов турмалина, с незапамятных времен были известны на Цейлоне и в древней Индии. Было установлено, что кристалл турмалина, помещенный в горячий пепел, сначала притягивает пепел, а затем отталкивает его. Однако прошли века и даже тысячелетия, пока об этом удивительном свойстве узнали в Европе. Это было время длительных, рискованных, но выгодных походов европейских купцов в Индию за пряностями, тонкими узорчатыми тканями, диковинными камнями. Вместе с этими драгоценностями и был завезен в Европу кристалл турмалина — черный блестящий минерал.

И не столько красота, сколько таинственные свойства турмалина привлекали всеобщее внимание. «Цейлонский магнит», «пеплопритягатель» — такие забавные названия кристаллов турмалина можно встретить в старых учебниках минералогии. Было установлено, что кристалл турмалина притягивает не только горячий пепел, но и обрывки бумаги, волосы и другие легкие тела.

Был проведен такой опыт: нагретый кристалл через шелковое сито посыпали смесью порошков серы и сурика. Оказалось, что кристалл турмалина сразу разделяет смесь порошков на красный сурик и желтую серу: сера прилипает к одному концу кристалла, а сурик — к другому. При трении о шелковые нити сита порошок электризуется, причем сера получает отрицательный заряд, а сурик — положительный. Известно, что отрицательно заряженные тела притягиваются лишь к положительному заряду и, наоборот, положительно заряженные тела — только к отрицательному. Стало быть, при нагревании кристалл турмалина электризуется, причем на одном конце его появляются отрицательные электрические заряды, а на другом — положительные. Подобные опыты проводились и с другими кристаллами, которые также

электризовались при нагревании.

Это явление получило название *пироэлектричества,* что в переводе означает электричество, возникающее от огня (от греческого слова «пирос» — огонь). Позже было установлено, что пироэлектричество тесно связано с пьезоэлектричеством. Однако потребовалось длительное время, прежде чем ученые узнали об этом.

Шли годы. В течение нескольких веков ученые многих стран шаг за шагом открывали новые удивительные свойства кристаллов. Начало кристаллографии — учению о свойствах, происхождении и выращивании кристаллов— было положено датчанином Николаем Стеноном в 1669 году. Большой вклад в эту науку внесли русские кристаллографы Федоров и Гадолин.

И только после того как были изучены основные свойства кристаллов и люди научились получать и использовать электрическую энергию, молодые французские ученые братья Пьер и Жак Кюри в 1880 году открыли явление пьезоэлектричества. Это открытие было не случайным. Своим успехом братья Кюри обязаны напряженному творческому труду многих ученых и инженеров. Интересен тот факт, что Пьер Кюри был физиком, а Жак Кюри — кристаллографом.

Чем же руководствовались братья Кюри в своем открытии? Какие свойства кристаллов их интересовали?

Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо вспомнить строение вещества и рассказать о свойствах кристаллов.

В МИРЕ КРИСТАЛЛОВ

Известно, что окружающие нас тела состоят из мельчайших невидимых глазом частиц — атомов. Размеры атомов чрезвычайно малы: они составляют стомиллионные доли сантиметра. Атомы объединяются в молекулы, более крупные частицы.

Молекулы бывают однородными и разнородными. Однородные молекулы состоят из одинаковых атомов, а разнородные — из самых различных. Вещество, состоящее из однородных молекул, простое, его нельзя разложить на какие-либо другие вещества. Если же в состав вещества входят молекулы, построенные из разных атомов, то такие вещества называются сложными. Вода, например, сложное вещество: она состоит из кислорода и водорода, которые уже нельзя разложить на другие вещества.

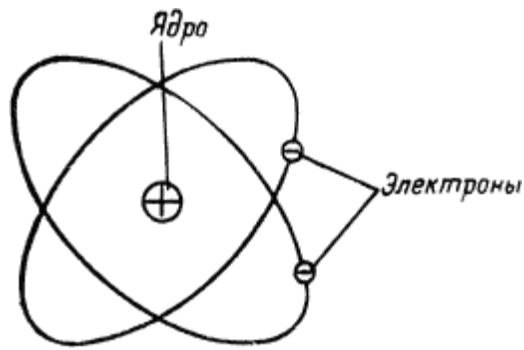


Рис. 1. ***В центре атома гелия находится положительно заряженное ядро, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны***

Сами атомы имеют сложное строение и состоят из электрически заряженных частиц. В центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого вращаются отрицательно заряженные частицы — электроны (рис. 1). При этом положительный заряд ядра уравновешен отрицательным зарядом электронов, и в своем обычном состоянии атом электрически нейтрален.

Если же изменить число электронов в атоме, то он выйдет из состояния равновесия. Если, например, удалить один или несколько электронов, то положительный заряд атома станет

больше отрицательного и весь атом в целом окажется заряженным положительно. Такой атом называется положительным ионом. Или наоборот, если добавить один или несколько электронов, то атом приобретет отрицательный заряд и превратится в отрицательный ион.

Как располагаются атомы в веществе? Расположены ли они в определенном порядке или беспорядочно, хаотично? Ответить на этот вопрос было трудно. Ведь атомы и молекулы настолько малы, что их невозможно увидеть даже в самый мощный микроскоп. Но ученые обошлись и без этого. Им помогли рентгеновские лучи, которые показали, как расположены атомы в разных веществах.

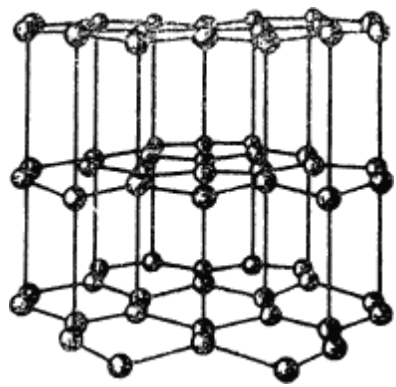


Рис. 2. ***Во все стороны тянутся ровные ряды атомов — так устроена пространственная решетка графита***

В кристаллических веществах частицы расположены геометрически правильно, по строгим законам. Если бы мы могли уменьшить свой рост до величины атома и проникнуть внутрь кристалла, то увидели бы, что вокруг нас во все стороны, не только вправо и влево, вперед и назад, но и вверх и вниз тянутся ровные бесконечные ряды атомов. Эти правильные ряды атомов в пространстве называются *пространственными решетками*, так как они действительно напоминают решетки (рис. 2).

С помощью рентгеновских лучей люди узнали, что у разных кристаллических веществ пространственные решетки разные. Каждое кристаллическое вещество можно отличить от другого кристаллического вещества по его пространственной решетке. В одних кристаллах очень простые решетки, в других — сложные.

Теперь мы можем сказать, что *кристаллы* — это тела, в которых атомы (молекулы, ионы) расположены в

пространственных решетках строгой геометрической формы.

Рентгеновские лучи обнаружили кристаллическое строение не только в известных до того времени кристаллах, но и во многих других телах. Даже сажа, человеческий волос, шерсть, шелк и т. п. оказались построенными из кристаллов.

Но во всех ли веществах атомы расположены геометрически правильно? Конечно, нет. Существуют и такие твердые тела, в которых атомы расположены в беспорядке, как в газе или в жидкостях. Подобные тела называются *аморфными,* что означает в переводе с греческого «бесформенный». К такой группе тел относятся стекло, смола, столярный клей.

Однако и в аморфных телах атомы с течением времени могут в одном месте или сразу в нескольких местах собраться в правильную решетку. Тогда в этих местах появляются микроскопически маленькие кристаллики. Постепенно они вырастают и заполняют всю массу тела: аморфное тело закристаллизовалось. Так можно наблюдать помутнение старого стекла. Оно становится мутным, потому что в нем образуется множество мелких непрозрачных кристаллов.

Кристаллические тела бывают двух видов. Кристаллы, имеющие природную форму многогранников — кубов, параллелепипедов, призм, пирамид, называются *монокристаллами* или просто кристаллами. Тела, не имеющие многогранной формы, а состоящие из множества мелких, сросшихся между собой кристалликов, называются *поликристаллами.*

Кристаллы различных веществ отличаются друг от друга по форме (рис. 3). Кристаллы кварца имеют форму шестигранных призм, алмаза — восьмигранника, а граната — двенадцатигранника. Столбики берилла никогда не спутаете с пластинками слюды. Самая простая форма у кристаллов поваренной соли — форма куба.

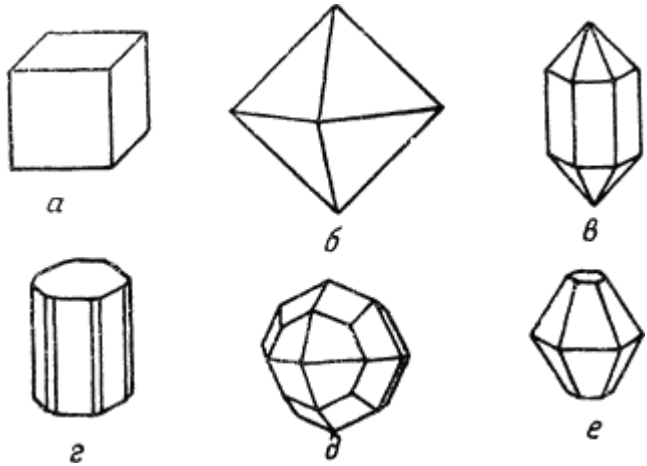


Рис. 3. ***Кристаллы различных веществ отличаются друг от друга по своей форме:***

а — кристалл поваренной соли; б — магнетит; в — кварц; г — берилл; д — лейцит; е — корунд

Но в природе редко встречаются кристаллы в виде правильных многогранников, чаще они неправильной формы. Это объясняется тем, что от действия воды, ветра, морозов кристаллы растрескиваются; в твердых породах кристаллы мешают друг другу расти; различные растворы разъедают кристаллы. Но все-таки свойства кристаллов остаются прежними. А что самое замечательное — остаются постоянными углы между одними и теми же гранями кристалла. Это свойство кристаллов называется *законом постоянства углов,* который объясняется внутренним строением кристаллов, т. е. тем, что частицы вещества расположены в геометрически правильной пространственной решетке. От ее формы и зависит форма кристалла. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим ячейку пространственной решетки кристалла поваренной соли (рис. 4). Этот кристалл состоит **из** молекул, каждая из которых содержит положительный ион натрия и отрицательный ион хлора. Поскольку разноименно заряженные тела притягиваются друг к другу, а одноименно заряженные отталкиваются, молекулы поваренной соли группируются так, чтобы расстояния между одноименными ионами были как можно большими, а между разноименными — как можно меньшими.

Поэтому ячейка пространственной решетки поваренной соли представляет собой куб, по углам которого, чередуясь в

шахматном порядке, располагаются ионы натрия и хлора, потому что такое расположение уравновешивает электрические силы ионов.

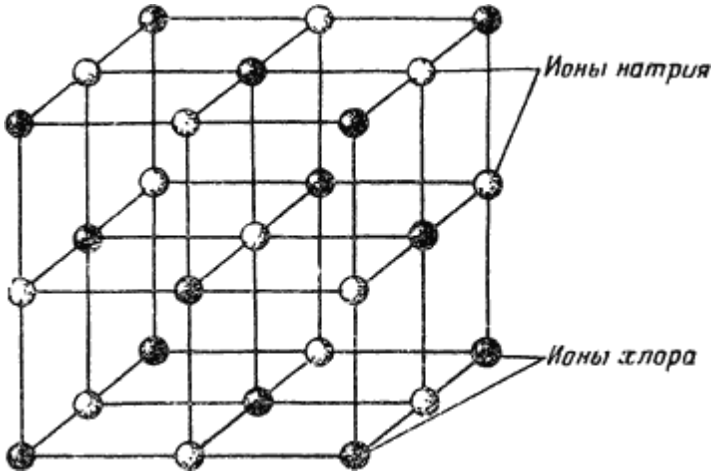


Рис. 4. Самая простая форма у кристалла поваренной соли — форма куба

Образованная таким образом ячейка кристалла является его зародышем. Если поместить ее в среду, насыщенную ионами натрия и хлора, то ячейка со всех сторон начнет обрастать все новыми и новыми молекулами. При этом разноименные ионы будут чередоваться в таком же шахматном порядке. Следовательно, при росте кристалла его грани будут передвигаться параллельно самим себе, а значит, углы между гранями кристалла не изменятся.

Таким же образом происходит образование и рост не только кристаллов поваренной соли, но и всех других кристаллических тел.

Проще всего получить кристаллы из насыщенных растворов. Такой раствор легко приготовить, если взять стакан горячей воды и насыпать в него любой порошок кристаллического вещества: сахара или соли, медного купороса или соды. При этом нужно размешивать порошок до тех пор, пока он не перестанет растворяться. Если раствор охладить, то растворимость вещества уменьшится и раствор станет пересыщенным. А это значит, что вещества в растворе оказалось больше, чем его может раствориться при данной температуре. Поэтому лишнее вещество выделяется из раствора и оседает на дне стакана в виде кристаллов. Чтобы получить кристаллы большей величины, надо

полученный осадок опустить в новый пересыщенный раствор. Проделывая это несколько раз, можно получить кристаллы значительных размеров.

Пересыщенный раствор можно получить и другим способом, оставив насыщенный раствор в открытом сосуде с широким дном и низкими стенками. Вода из такого сосуда будет испаряться, а растворенные вещества останутся и раствор окажется пересыщенным. Кристаллы можно получить также из твердых и газообразных веществ. Так, из охлажденных водяных паров образуются кристаллики снега и льда. Примером образования кристаллов из твердого вещества может служить кристаллизация аморфных тел.

В настоящее время выращивание кристаллов из растворов превратилось в целую техническую отрасль. Созданы заводы и фабрики, на которых в больших количествах выращивают крайне нужные для нашего народного хозяйства кристаллические вещества.

Какими же еще свойствами обладают кристаллы?

Если ударить по кристаллу, то он расколется на маленькие кристаллики — осколки, которые по форме окажутся такими же, как и большой кристалл до удара. Кристалл поваренной соли, например, расколется на правильные кубики, а кристаллы слюды можно расщепить только в одном направлении — в виде тонких лепестков.

Это свойство кристаллов называется *спайностью,* а плоскости, по которым кристалл раскалывается, — *плоскостями спайности.* Поэтому кристаллы легко отличить от аморфных тел, прочность которых одинакова по всем направлениям.

Твердость кристаллов также зависит от направления. Поцарапайте кристалл иглой и вы заметите, что в одном направлении это сделать легче, чем в другом.

Если из кристаллического вещества выточить шар и опустить его в пересыщенный раствор такого же вещества, то уже через несколько часов на шаре появятся ровные площадки граней, которые будут увеличиваться, пока шар снова не превратится в многогранник. Следовательно, скорость роста в кристаллах тоже зависит от направления, иначе шар никогда бы не превратился в многогранник.

Известно, что при нагревании вещества расширяются. Если же нагреть шар, выточенный из кристалла, то расширяться он будет по разным направлениям по-разному. Например, кристалл кварца в одном из перпендикулярных направлений при нагревании расширяется вдвое больше. Другие физические свойства кристаллов — теплопроводность, электропроводность,

оптические свойства — тоже зависят от направления. Это свойство называется *анизотропией,* что в переводе означает неравносвойственность.

Анизотропными свойствами обладают не только кристаллы. Вам не раз приходилось колоть дрова, и вы, конечно, заметили, что кусок дерева легко расколоть в одном направлении и очень трудно в другом. Стало быть, дерево тоже обладает анизотропными свойствами.

В отличие от кристаллических тел свойства аморфных тел не зависят от направления. Это свойство называется *изотропией*. Слово «изотропный» означает одинаковый по всем направлениям.

Чем же объясняются анизотропные свойства кристаллов? Если посмотреть на пространственную решетку какого-нибудь кристалла и мысленно провести в одном направлении линию, то она пересечет определенное число атомов, отстоящих друг от друга на определенных расстояниях. Если провести линию в другом направлении, то она пересечет уже другое число атомов, отстоящих друг от друга на иных расстояниях. Это и является причиной анизотропии кристаллов.

Возьмите большой кристалл кварца и от противоположных концов его одинаковыми по силе ударами отколите небольшие кусочки. Вы убедитесь, что с обоих концов по одинаковым плоскостям отколются равные **по** величине кусочки. Следовательно, прочность кристалла одинакова в разных местах. Можно провести ряд других опытов и показать, что и другие свойства кристалла одинаковы в разных местах, но различны в разных направлениях. Это свойство, тоже общее для всех кристаллов, называется *однородностью.* Однородность кристаллов, как и анизотропия, является следствием внутреннего строения кристаллов.

Кристаллы обладают еще одним общим свойством — они *симметричны* Посмотрите на кристаллы воды — снежинки. Они состоят из нескольких совершенно одинаковых частей. Такие тела называются симметричными, а плоскости, разделяющие одинаковые части, — плоскостями симметрии. Примерами симметричных геометрических фигур могут служить круг, квадрат, параллелограмм (рис. 5).

Для симметричных тел свойственно понятие *центра симметрии.* У круга он находится в центре, у параллелограмма — в точке пересечения его диагоналей. Однако у многих кристаллов центра симметрии нет.

Понятие центра симметрии у кристаллов гораздо шире, чем у прочих симметричных тел. Если до этого мы рассматривали симметрию различных тел только по форме, то симметрия

кристаллов заключается не столько в форме, сколько в физических свойствах — прочности, твердости, электропроводности и других. Так, например, если разрезать кристалл кварца по плоскостям симметрии на разные части, то каждая из них будет похожа на другую не только по форме, но и по своим физическим свойствам.

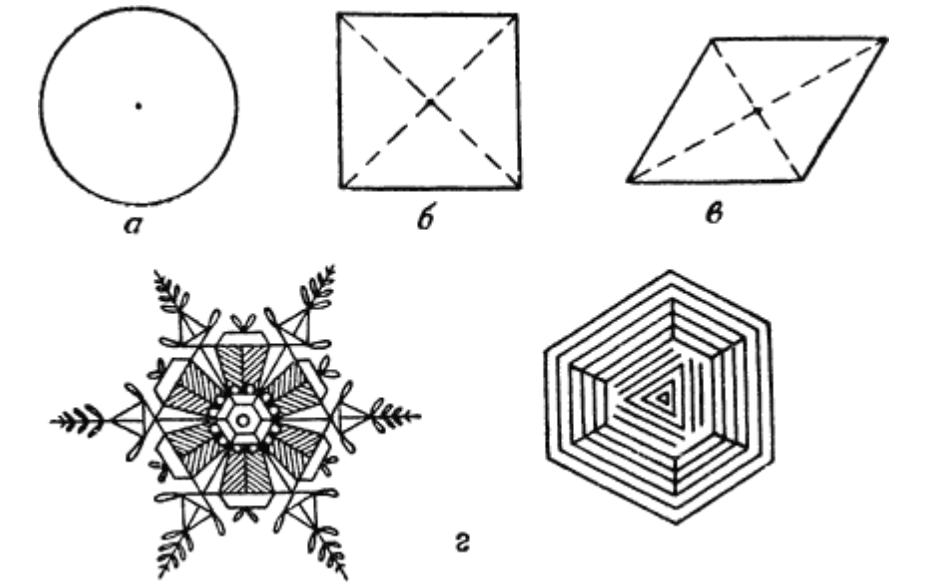


Рис. 5. ***Все симметричные тела имеют центр симметрии:***

а — круг; б — квадрат; в — параллелограмм; г — кристаллы воды — снежинки

Благодаря свойству симметрии ученые распределили все существующие в природе кристаллы по классам и системам, что очень помогает при описании и изучении их. Оказалось, что по симметрии кристаллы делятся на 32 класса. При этом только 12 классов имеют центр симметрии, а остальные 20 его не имеют.

Но самым примечательным оказалось то, что только кристаллы, не имеющие центра симметрии, обладают пьезоэлектрическими свойствами. Только они в результате механического воздействия способны выделять электрические заряды.

Какова же природа пьезоэлектричества? Почему пьезоэлектричество наблюдается только у кристаллов, не имеющих центра симметрии, и не может наблюдаться у других?

ОТКРЫТИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Вскоре после открытия электрического тока стало известно, что все окружающие нас вещества можно разделить на две большие группы. Вещества первой группы проводят электрический ток, почему и получили название *проводников.* К ним относятся, например, все металлические тела. Другие вещества вообще тока не проводят — их назвали изоляторами, или *диэлектриками.* К ним относятся фарфор, стекло, мрамор и др. Между этими группами веществ находится еще одна большая группа — полупроводники.

Почему металл проводит ток, а диэлектрик не проводит? Ведь и тот и другой состоит из атомов, т. е. из ядер, окруженных электронными оболочками. Дело в том, что в проводниках электроны слабо связаны со своими ядрами. Если металлический проводник расположить между отрицательным и положительным полюсами электрической батареи, то электроны под действием электрического поля легко оторвутся от своих ядер и устремятся к положительному полюсу. Такое движение свободно заряженных частиц (зарядов) и называется *электрическим током*.

Совсем другое наблюдается в диэлектриках. В них электроны крепко связаны со своими ядрами и даже сильное электрическое поле не может их разъединить. А раз нет движения свободных электрических зарядов, то нет и электрического тока. Однако в диэлектриках происходит другое интересное явление, получившее название *поляризации диэлектриков.* На этом явлении необходимо остановиться подробнее, так как оно лежит в основе пьезоэлектричества.

Поляризация диэлектриков заключается в образовании внутри вещества так называемых электрических диполей. Электрическим диполем называют частицу вещества, содержащую два разноименных заряда, находящихся на некотором расстоянии один от другого (рис, 6). Поэтому электрический диполь — своего рода маленький заряженный конденсатор с двумя разноименными полюсами. От греческого слова «полюс» и произошло название явления поляризации.

Как же происходит образование электрических диполей в диэлектриках?

Вы уже знаете, что отрицательно заряженные частицы атома — электроны вращаются вокруг положительно заряженного ядра. Центр тяжести вращающихся электронов находится в центре орбит, по которым они вращаются, т. е. в центре положительного ядра. А это означает, что положительные и отрицательные заряды

как бы сосредоточены в одной точке. Но поскольку заряды всех вместе взятых электронов и ядра по величине равны, то они нейтрализуют друг друга. Вот почему мы и говорим, что в обычном состоянии атом электрически нейтрален.

Рис. 6. ***Электрический диполь напоминает заряженный конденсатор с разноименными полюсами***

Но стоит только поместить диэлектрик в электрическое поле, как связанные и неотделимые друг от друга положительные и отрицательные заряды (электроны и ядра) словно по команде смещаются относительно друг друга: электрон — в сторону положительного полюса, ядро — в противоположную. При этом орбита электрона слегка вытягивается (рис. 7).

В результате смещения зарядов центры тяжести разноименно заряженных частиц уже не будут совпадать. А это значит, что образовался электрический диполь. Поскольку в диэлектрике образуется множество таких диполей и все они своими полюсами направлены! в одну сторону, то это равносильно тому, что весь диэлектрик превратился в электрически заряженный конденсатор. Это- явление и называется поляризацией диэлектрика.

В природе, оказывается, существуют такие вещества, которые и без воздействия электрического поля имеют дипольную структуру. Они получили название полярных диэлектриков, к которым и относятся пьезокристаллы.

Каждая ячейка пространственной решетки любого пьезокристалла представляет собой электрический диполь. Этот диполь образован центрами тяжести групп отрицательных и групп положительных частиц, составляющих ячейку. Центры тяжести групп разноименно заряженных частиц в ячейке не совпадают потому, что пьезокристаллы не имеют центра симметрии.

Таким образом, пьезокристаллы полярны из-за отсутствия центра симметрии. Кристаллы, имеющие центр симметрии, неполярны и поэтому не могут быть пьезоэлектрическими.

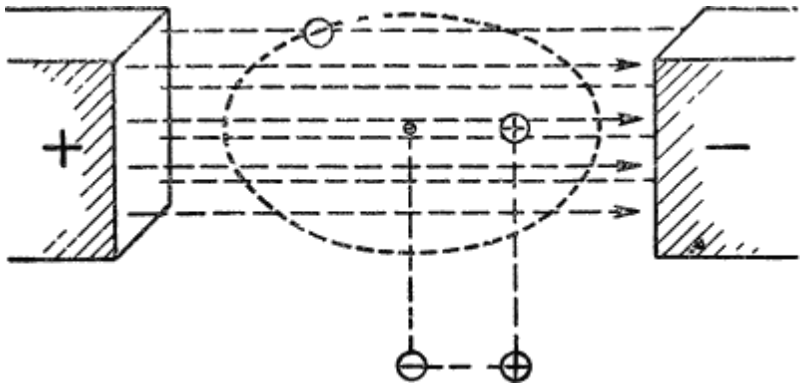


Рис. 7. Смещение ядер и электронов в диэлектрике, помещенном в электрическое поле, приводит к образованию электрических диполей

Посмотрите на ячейку-кубик кристалла поваренной соли. Она представляет собой правильный куб с шестью квадратными гранями. Центр симметрии такого куба находится в точке пересечения диагоналей. В вершинах куба расположены четыре отрицательных иона хлора и четыре положительных иона натрия. Как положительные, так и отрицательные ионы расположены одинаково относительно центра куба. А это значит, что центры тяжести положительных и отрицательных групп ионов находятся в одной точке — в центре куба, т. е. в центре его симметрии.

Попробуйте мысленно сжать ячейку-кубик кристалла поваренной соли. Кубик превратится в параллелепипед (рис. 8). Но и в этом случае центры тяжести положительных и отрицательных групп ионов будут лежать в одной точке. Следовательно, и в нормальном состоянии, и при механическом воздействии кристалл поваренной соли не имеет дипольной структуры, значит, он не полярный.

В кристаллах, не имеющих центра симметрии, вы будете наблюдать другую картину. Если подвергать такие кристаллы сжатию или растяжению, то под воздействием механической силы электрические диполи будут занимать определенное положение, в результате чего возникает электрическая поляризация (рис. 9).

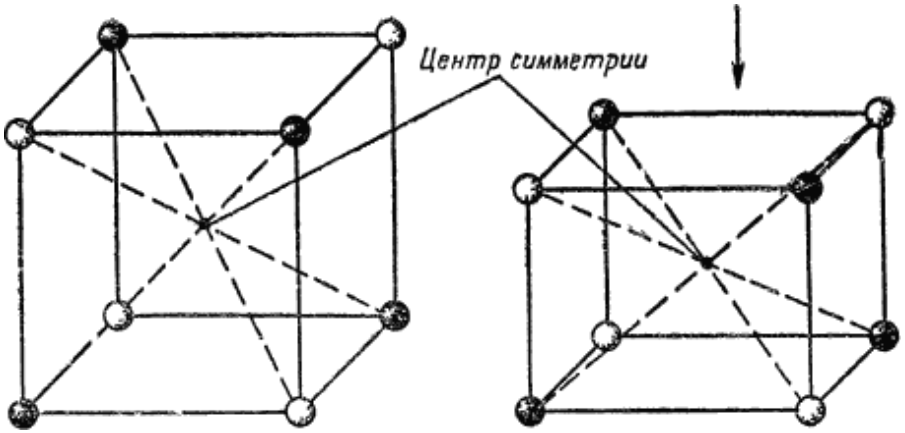


Рис. 8. *Если сжать ячейку кристалла поваренной соли, то центры тяжести положительно и отрицательно заряженных ионов останутся в одной точке — центре симметрии*

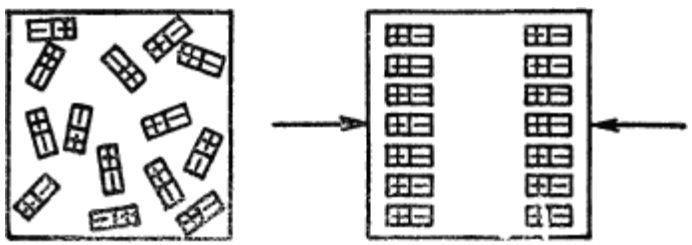


Рис. 9. *Под воздействием механической силы диполи занимают определенное положение*

Итак, причиной поляризации кристаллов является отсутствие центра симметрии, или *дисимметрия* кристаллов. К этому выводу и пришли братья Кюри, изучая поляризацию кристаллов.

К этому времени были уже открыты основные законы кристаллографии и свойства кристаллов были изучены довольно хорошо. Было известно, что все монокристаллы можно разделить на две группы — кристаллы, имеющие центр симметрии, и кристаллы, не имеющие его. Проводя опыты над различными группами, братья Кюри заметили, что пироэлектричество, т. е. выделение электрических зарядов на поверхности кристаллов при их нагревании, наблюдается только у кристаллов, не имеющих центра симметрии. Следовательно, дисимметрия кристаллов и является причиной образования электрических зарядов.

А можно ли другим путем выделить электрические заряды,

например, сжав или растянув кристалл? Ведь сжатие и растяжение сопутствуют охлаждению и нагреванию тела. Произойдет ли в этом случае поляризация?

Был проделан опыт. Тонкую прямоугольную пластинку, вырезанную из кристалла кварца, расположили между двумя пластинками из оловянной фольги. Пластинки из фольги служили электродами, к которым был присоединен прибор для обнаружения электрических зарядов — электрометр. При сжатии кварцевой пластинки стрелка электрометра отклонялась в одну сторону, при растяжении — в другую. А это означало, что при сжатии на одном электроде возникал положительный электрический заряд, на другом — отрицательный. При изменении направления механического давления, т. е. при растяжении, знаки электрических зарядов на электродах менялись на обратные. При этом чем больше была сила давления, тем больше была и величина возникающих зарядов. Такое явление было названо *прямым пьезоэлектрическим эффектом* (рис. 10).

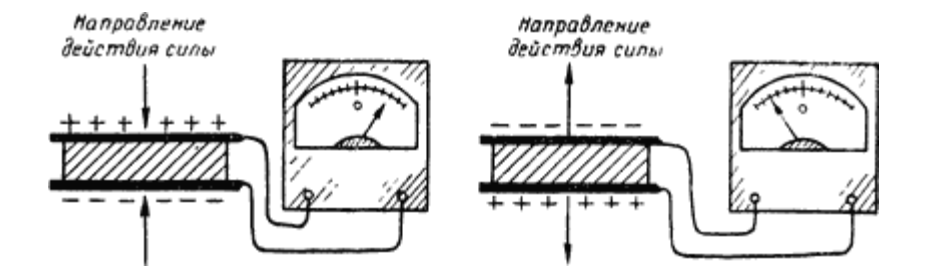


Рис. 10. ***Прямой пьезоэлектрический эффект***

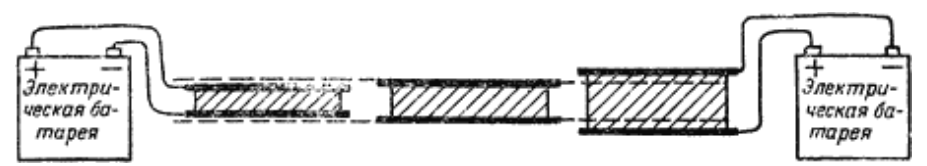


Рис. 11. ***Обратный пьезоэлектрический эффект***

Братьями Кюри был открыт и *обратный пьезоэлектрический эффект* (рис. 11). Он заключается в следующем. Если к точно такой же кварцевой пластинке, снабженной электродами, присоединить источник электричества, т. е. поместить пластинку

в электрическое поле, то толщина ее изменится: пластинка либо сожмется, либо растянется. Сжатие и растяжение происходит в зависимости от полярности заряда. Чем большая величина электрических зарядов будет сосредоточена на электродах, т. е. чем сильнее действует электрическое поле, тем больше будет меняться толщина пластинки. Изменение ее толщины часто называют *деформацией.*

Братья Кюри также доказали, что пьезоэлектрическими свойствами обладают и другие кристаллы, не имеющие центра симметрии: сахар, цинковая обманка, турмалин, винная кислота, топаз, сегнетова соль и другие.

Смелое научное предположение, сделанное братьями Кюри, о том, что кристаллы, не имеющие центра симметрии, способны выделять электрические заряды, полностью подтвердилось. Так было открыто пьезоэлектричество.

ПЬЕЗОКРИСТАЛЛЫ

Впервые пьезоэлектрические свойства были обнаружены у кристалла кварца. Вам, наверное, приходилось любоваться прозрачными и, бесцветными, похожими на лед, кристаллами горного хрусталя. А это и есть одна из разновидностей кварца. В древности так и считали, что горный хрусталь и лед — одно и то же, только лед замерзает у нас на глазах, а горный хрусталь при очень большом морозе. Это, конечно, неверно, и сейчас так никто не думает. Уже давно установлено, что лед — кристалл воды, состоящий из водорода и кислорода, а составными частями горного хрусталя являются кислород и кремний.

Помимо горного хрусталя, кварц встречается почти в двухстах разновидностях. Тут и золотисто-желтый цитрин, кроваво-красный сердолик, красновато-коричневый с золотым отливом авантюрин, фиолетовый аметист. Почти одна десятая часть земной коры приходится на различные виды кварца. Даже обыкновенный песок состоит главным образом из кварцевых зерен.

Кварцу присущи разнообразные свойства, и поэтому он широко применяется в науке и технике. Если обычное стекло, например, задерживает ультрафиолетовые лучи, то кварц пропускает их. Это свойство используется медициной для лечения «горным солнцем», а также в оптике, где из кварца изготовляют призмы и линзы для астрономических и других оптических приборов.

Кварц тверд, прочен, упруг и тугоплавок. Посуда из кварцевого стекла останется невредимой, если раскалить ее докрасна и сразу погрузить в ледяную воду. Кварц устойчив почти ко всем кислотам и плохо проводит электрический ток. Но самыми замечательными являются, как вы уже знаете, пьезоэлектрические свойства кварца.

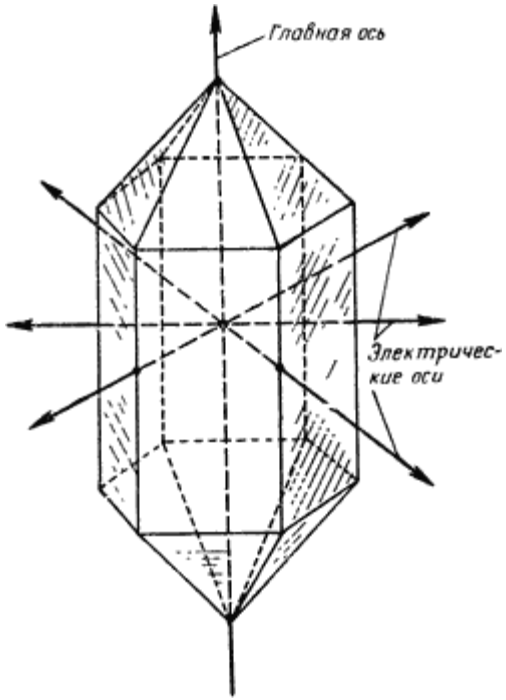


Рис. 12. ***Кристалл кварца***

Взгляните на кристалл кварца (рис. 12). Он имеет вид правильной шестигранной призмы, которая оканчивается шестигранными пирамидами. Мысленно проведите линию, соединяющую вершины пирамид. Это будет одна из осей симметрии кристалла кварца. Назовем ее главной осью. Если провести линию через противоположные углы призмы и так, чтобы она была перпендикулярна главной оси, то получим так называемую электрическую ось. Всего у кристалла кварца три электрические оси.

Свойства кварца, в том числе и пьезоэлектрические, различны именно вдоль этих направлений. Вдоль главной оси эти свойства одни, а вдоль электрических осей совершенно другие.

Чтобы получить пьезоэлектрический эффект, необходимо из целого кристалла кварца вырезать тонкую пластинку. Но из кристалла можно вырезать пластинки под любыми углами к осям. И все они будут обладать разными пьезоэлектрическими свойствами.

Как же правильно вырезать пластинку? Оказывается, что наибольшим пьезоэлектрическим эффектом обладает пластинка, вырезанная из кристалла так, чтобы ее поверхность была

перпендикулярна одной из электрических осей. Пластинка, вырезанная в другом направлении, будет обладать меньшими пьезоэлектрическими свойствами, а пластинка, вырезанная параллельно электрическим осям, вообще не обнаруживает этих свойств.

Кварц хотя и твердый кристалл, но очень хрупок. Он может выдерживать действие очень большой силы но ломается при резком ударе. Однако главный недостаток кварца не в этом. Непрерывно развивающаяся пьезоэлектрическая техника требует все больше и больше этого минерального сырья. При этом требуется не любая разновидность кварца, а горный хрусталь самого высокого качества — без пузырьков, трещин и посторонних минералов. Такие кристаллы встречаются редко. Но и из них используется лишь небольшая часть, остальное теряется в отходах. Поэтому природный пьезокварц ценится лишь немного ниже золота.

Сравнительно недавно наши ученые начали искусственно выращивать кристаллы кварца необходимых размеров. Правда, растут эти кристаллы очень медленно и пока дороги.

Ученые обратились к другим веществам и в первую очередь к кристаллам *сегнетовой соли,* пьезоэлектрические свойства которой были открыты братьями Кюри. До этого сегнетова соль широко применялась в медицине. Впервые ее получил из солей винной кислоты французский аптекарь Сегнет.

Познакомимся поближе с этим веществом. Сегнетова соль удобна тем, что ее кристаллы (рис. 13) легко выращиваются искусственным путем и легко обрабатываются. Кристалл сегнетовой соли можно разрезать обыкновенной ниткой, смоченной водой. Мокрая нитка при своем движении быстро растворяет кристалл, углубляясь в него..

Сегнетова соль по сравнению с другими пьезокристаллами, в том числе и кварцем, обладает значительно большим пьезоэлектрическим эффектом. Самое ничтожное механическое воздействие приводит к появлению на электродах электрических зарядов.

Однако сегнетовой соли свойственны и серьезные недостатки, которые ограничивают ее практическое применение. Это в первую очередь низкая температура плавления (около 60°), при которой сегнетова соль теряет свои пьезоэлектрические свойства и уже больше не восстанавливает их. Сегнетова соль растворяется в воде и, следовательно, боится влаги. Кроме того, она непрочна и не выдерживает больших механических нагрузок.

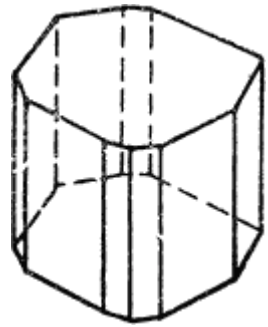


Рис. 13. Кристалл сегнетовой соли

Долгое время искали заменитель сегнетовой соли, который был бы близок к ней по пьезоэлектрическим свойствам и не имел бы ее недостатков. И такой заменитель был найден. Сделали это советские ученые под руководством члена-корреспондента Академии наук СССР Б. М. Вула. *Титанат бария* — так называется это вещество, наделенное удивительными и ценными свойствами.

Титанат бария не является монокристаллом, как кварц и сегнетова соль. Это поликристалл, состоящий из большого числа сросшихся между собой кристалликов. Каждый из кристалликов не имеет общего центра симметрии отрицательных и положительных зарядов, и поэтому он пьезоэлектрический (рис. 14). Но в обычном состоянии все кристаллики расположены один относительно другого без всякой закономерности, беспорядочно. А это означает, что все вещество в целом не обладает пьезоэлектрическими свойствами.

Как же удалось сделать титанат бария пьезоэлектрическим веществом? Ясно, что для этого нужно было повернуть все кристаллики так, чтобы они были направлены более или менее одинаково. Это было сделано при помощи электрического поля.

В недрах земли титанат бария встречается очень редко, и поэтому его получают искусственным путем. Смесь двух минеральных веществ — углекислого бария и двуокиси титаната — обжигают при очень высокой температуре. Получается желтовато-белая масса, которая по своему виду и механическим свойствам напоминает обыкновенную глину. Этой массе, как и глине, можно придать любые размеры и формы. В то же время она будет механически прочная и нерастворимая в воде, как и любое керамическое изделие. Вот за это сходство с керамикой титанат бария и получил название *пьезокерамики.*

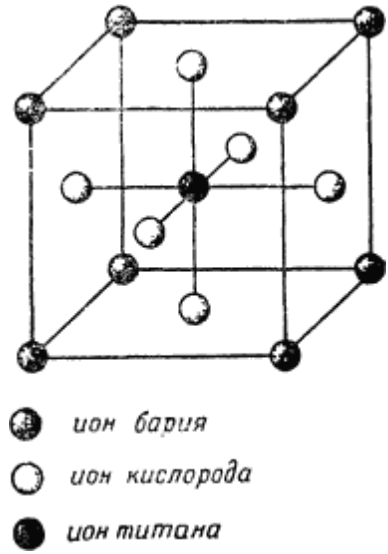


Рис. 14. ***Кристалл титаната бария не имеет общего центра симметрии отрицательных и положительных зарядов***

Чтобы титанат бария приобрел пьезоэлектрические свойства, обожженную массу помещают в сильное электрическое поле, а затем охлаждают. Под воздействием электрического поля происходит поляризация кристалликов титаната бария, их диполи занимают одинаковое положение, а после охлаждения «замораживаются» в этом состоянии.

Замечательными свойствами обладает пьезокерамика. В процессе изготовления ей можно придать любую форму. Но в то же время она чрезвычайно прочна, а главное, не боится влаги. Пьезоэлектрический эффект у титаната бария в 50 раз больше, чем у кварца, а стоимость его в 100 раз меньше. Пьезоэлектрические пластинки из титаната бария можно изготовлять в больших количествах, потому что сырья для этого сколько угодно.

Вы познакомились с основными видами и свойствами пьезоэлектрических веществ, узнали природу пьезоэлектричества. Где же и каким образом используется это явление в военном деле и в народном хозяйстве?

Начало практическому применению пьезоэлектричества было положено работами знаменитого французского ученого Поля Ланжевена. Рассказом об этих работах, которые проходили при весьма любопытных обстоятельствах, мы и продолжим паше знакомство с пьезоэлектричеством.

ПУТЕВКА В ЖИЗНЬ

В самом начале первой мировой войны произошло трагическое событие. Три английских крейсера стали жертвой немецкой подводной лодки. Они были потоплены один за другим почти одновременно. Так начали действовать подводные лодки — новая грозная и активная сила в войне на море.

Успешность боевых действий подводных лодок непрерывно росла. Особенно усердствовали немецкие подводники. Не проходило и недели, чтобы немецкие подводные пираты не пускали ко дну французский или английский корабль. Но наибольшее число потерь было среди безоружных транспортов и пассажирских судов. Поэтому такие государства, как Англия и Франция, экономика которых почти целиком зависела от морских перевозок, приложили немало усилий для организации борьбы с подводными лодками.

Самое худшее заключалось в том, что подводные лодки были невидимы и надводные корабли не успевали принять меры к защите. Ведь подводную лодку в подводном положении можно обнаружить невооруженным глазом в исключительно прозрачной воде на глубинах не более 10–15 метров, находясь над нею, а на больших глубинах и ночью лодка совершенно невидима.

Было ясно, что для успешной борьбы с подводными лодками необходимы прежде всего приборы, способные обнаруживать их под водой.

Вскоре такие приборы были созданы. Это сделал знаменитый французский ученый-физик Поль Ланжевен. В 1918 году он вместе с русским инженером К. Шиловским предложил использовать для обнаружения подводных лодок *ультразвуковой пьезоэлектрический излучатель.*

Своими работами по пьезоэлектричеству и ультразвуку Поль Ланжевен открыл первую страницу в истории целого ряда наук и технических отраслей. Сюда в первую очередь относится гидроакустика — наука, занимающаяся изучением звуковых явлений в воде.

Любопытны обстоятельства, при которых приходилось работать Ланжевену и его сотрудникам. Опыты с ультразвуком Ланжевен проводил в бассейнах, наполненные морской водой. Работы, конечно, были тщательно засекречены. Чтобы сбить немецких шпионов с толку, был пущен слух, что опыты проводятся с мифическими «лучами смерти», а стало быть, подходить близко к бассейнам опасно для жизни. Для большей убедительности этого слуха в бассейн напустили рыб. Каково же

было изумление Ланжевена, когда во время опытов он увидел, что рыбы погибли. Ультразвуки действительно оказались «лучами смерти».

Что же произошло и почему погибли рыбы? Ответить на этот вопрос можно после небольшого экскурса в мир звуков и ультразвуков.

Оттяните и отпустите струну музыкального инструмента. Вы услышите мелодичный звук. Под действием колебаний струны возникнут сгущения и разряжения, распространяющиеся во все стороны в виде звуковых волн подобно тому, как бегут волны на поверхности воды, в которую брошен камень.

Частицы воздуха при этом не перемещаются. Они только колеблются, смещаясь вперед и назад на небольшое расстояние. Это колебательное движение передается частицам вещества все дальше и дальше, пока звук не достигнет нашего уха.

Итак, звук — это колебания мельчайших частиц среды, в которой находится источник звука. В этом природа всех без исключения звуков.

В нашем примере источником звука была струна. Однако им может быть и любое другое колеблющееся тело. Если такой источник звука, например колеблющуюся стальную пластинку, поместить в воду, то в воде тоже возникнет звуковая волна. Она также является результатом колебательного движения частиц, но теперь уже частиц воды (рис. 15).

Звук в различных веществах распространяется с разной скоростью. В воздухе — со скоростью примерно 330 метров в секунду, а в воде около 1,5 километра в секунду. Еще быстрее распространяется звук в твердых телах.

В природе существует бесчисленное количество звуков, но очень многие из них человек не слышит. Дело в том, что человеческое ухо воспринимает звуки с частотой от 16 до 18 000 —20 000 колебаний в секунду (герц).

Звуки с частотой свыше 20 000 герц называются *ультразвуками.* Их часто называют еще неслышимыми звуками, потому что они не воспринимаются человеческим ухом. Не слышим мы и звуки, частота которых ниже 16 герц — это *инфразвуки.*

В природе человек часто сталкивается с явлением эха. Оно наблюдается в горах при отражении звуковых волн от скал, в лесу при отражении от его границ, в городах при отражении звука от стен больших зданий. Явление эха возникает и в воде.

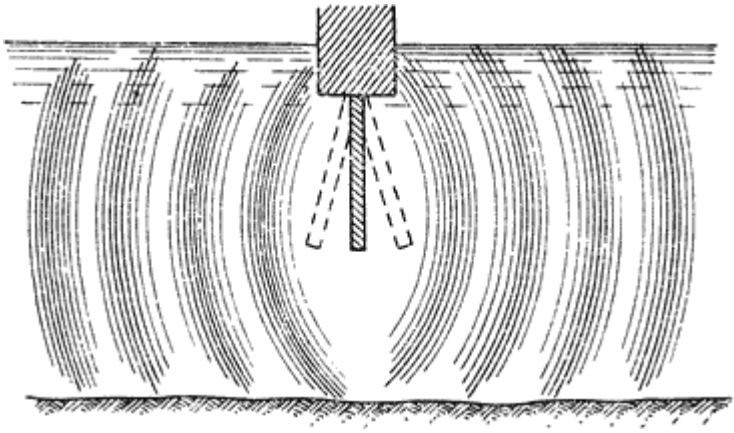


Рис. 15. Помещенная в воду колеблющаяся стальная пластинка является источником звуковых волн

Теперь понятно, почему Поль Ланжевен обратился к звуковым явлениям. Ведь, во-первых, звук в воде распространяется на большие расстояния, а во-вторых, с помощью отраженных эхо-сигналов можно определить расстояние до погруженной подводной лодки.

Конечно, способ измерения расстояний при помощи эха был известен давно. Его пытались использовать для обнаружения различных препятствий, с которыми мог столкнуться корабль. Такие работы начались после того, как в 1912 году весь мир был потрясен ужасной катастрофой — океанский пароход «Титаник» столкнулся с айсбергом и за несколько минут пошел ко дну вместе с тысячами пассажиров. Именно тогда ученые стали конструировать звуковые приборы для обнаружения подводных препятствий.

В качестве источника звука применяли пакет взрывчатого вещества, создававший в воде звуковые волны (рис. 16). Предлагались и другие виды источников звука. Но все они имели один недостаток: излучение звука происходило равномерно во все стороны. А это означало, что нельзя было установить направление, в котором находилось препятствие, отразившее звук. Кроме того, звуковые волны, создаваемые этими источниками, отражались только от больших подводных препятствий — крупных льдин, берега, дна. Нечего было и думать об обнаружении такой маленькой цели, как подводная лодка.

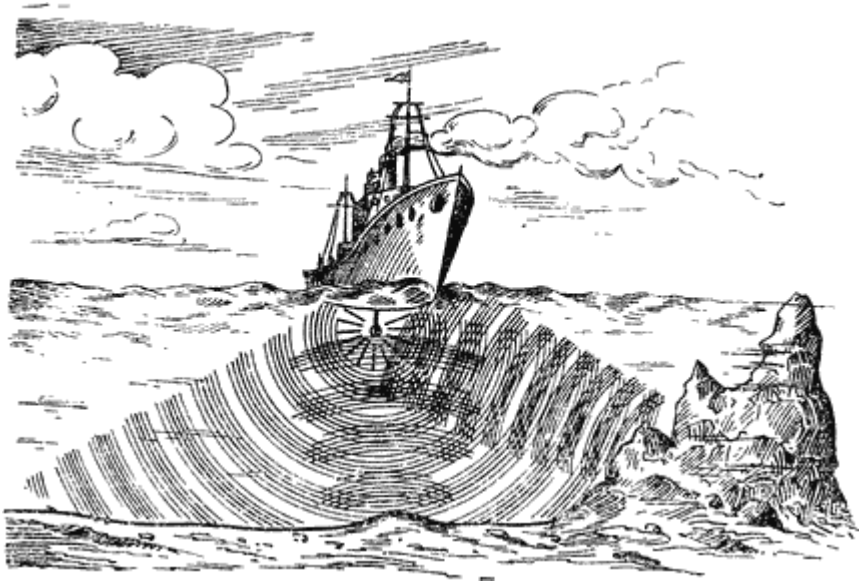


Рис. 16. Обнаружение подводных препятствий при помощи ненаправленных источников звука

Необходимо было найти новый источник, который бы посылал и принимал волны узким пучком в нужном направлении подобно тому как прожектор направляет луч света. Таким источником мог быть только ультразвуковой излучатель.

Но каким образом создать ультразвуковые волны в воде?

После долгих исканий ученые остановились па источнике ультразвуковых волн, главной частью которого была пьезокварцевая пластинка.

Если к электродам кварцевой пластинки подключить источник переменного электрического тока, то пластинка будет сжиматься и разжиматься, т. е, колебаться с частотой электрического тока источника. Колебаний пластинки передаются среде, в результате чего возникает звуковая волна. Если частота переменного электрического тока свыше 20 000 герц, то кварцевая пластинка будет излучать ультразвуки. В этом и заключается принцип работы пьезоэлектрического излучателя.

Так кропотливая и настойчивая работа ученых привела к созданию приборов, играющих немаловажную роль в современной войне на море. Вместе с тем эти работы положили начало практическому применению пьезоэлектричества. Бывшее в течение десятков лет «научным курьезом», не имеющим какой-либо практической ценности, пьезоэлектричество получило

путевку в жизнь.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Чтобы обнаружить подводное препятствие, нужно не только излучить ультразвук, но и принять отразившееся эхо. Отраженная волна, встретив на своем пути кварцевую пластинку, воздействует на нее, в результате чего пластинка будет сжиматься и разжиматься. На противоположных электродах попеременно появятся разноименные заряды, которые после усиления и преобразования подаются на индикаторные приборы.

Устройство, позволяющее преобразовать энергию электрического тока в звуковую энергию и, наоборот, звуковую энергию в энергию электрического тока, принято называть акустическим преобразователем. Если при этом используется пьезоэлектрический эффект, то преобразователь называется пьезоэлектрическим.

Пьезоэлектрические преобразователи нашли широкое применение в гидроакустических приборах различного назначения. Чаще всего это либо приемники, служащие только для приема звуковых или ультразвуковых колебаний, либо излучатели, служащие для создания звуковых или ультразвуковых волн.

Однако в ряде гидроакустических приборов, сконструированных для обнаружения подводных лодок, для излучения колебаний и приема отраженных эхосигналов используется один и тот же преобразователь или, как его обычно называют, вибратор. Для переключения преобразователя с передачи на прием применяется специальное коммутационное устройство,

Маленькая кварцевая пластинка не могла создать колебания большой мощности. Чтобы увеличить дальность распространения ультразвука, излучатель должен быть больших размеров. В распоряжении же ученых были небольшие встречающиеся в природе кристаллы кварца.

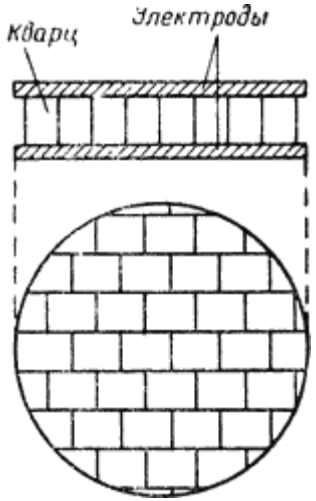


Рис. 17. Кварцевая мозаика

Выход был найден. На стальной лист, служивший одним из электродов преобразователя, наклеили мозаику из кварцевых пластинок (рис. 17).

Пьезоэлектрическая мозаика набирается из большого числа пластинок как правильной, так и неправильной формы. При этом очень важно, чтобы пластинки плотно прилегали друг к другу.

При наборе мозаики все пластинки должны иметь одинаковую полярность. Это означает, что если сжать мозаику, то на всех пластинках на поверхности, обращенной в одну сторону, должны появиться одноименные заряды. Если же полярность пластинок перепутать, то на одних пластинках возникнут положительные заряды, а на других — отрицательные. Эти заряды будут компенсировать друг друга, и пьезоэффекта не произойдет. Поэтому еще до сборки мозаики на специальном приборе определяют полярность каждой пластинки.

В отличие от излучателя в приемнике не требуется создавать мощных звуковых или ультразвуковых колебаний. Поэтому пьезоэлектрический приемник обычно небольших размеров. Зато в приемниках используются самые чувствительные пьезокристаллы (сегнетова соль, титанат бария). Чем выше чувствительность приемника, тем меньший по силе звук может быть принят.

Пьезоэлектрический приемник состоит из мембраны, на внутренней стороне которой набирается столбик из тонких пьезоэлектрических пластинок. Между пластинками

прокладываются электроды из тонкой металлической фольги. Столбик вместе с мембраной вставляется в металлический корпус и плотно зажимается в нем (рис. 18).

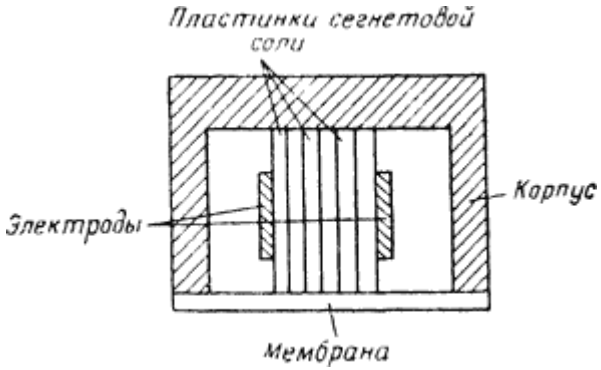


Рис. 18. Сегнетоэлектрический приемник

Механические колебания среды воздействуют на мембрану приемника, в результате чего на электродах образуются электрические заряды. Электроды, на которых возникают одноименные заряды, соединены между собой. Общие концы проводов, идущих от электродов, выводятся через сальник к усилителю.

Наряду с пьезоэлектрическими в настоящее время применяются магнитострикционные преобразователи. Магнитострикция — явление, сходное с пьезоэлектричеством.

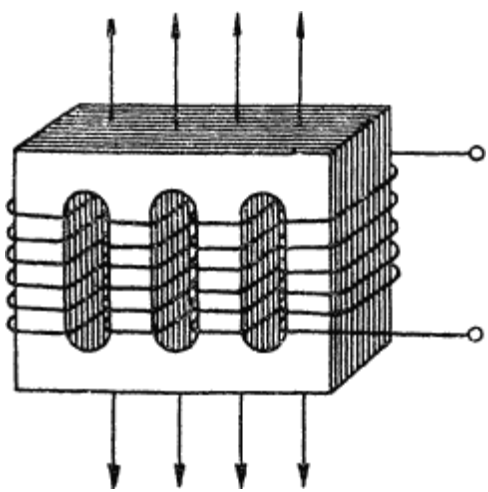


Рис. 19. Магнитострикционный излучатель

Некоторые металлы, например никель, нержавеющая сталь и отдельные сплавы, обладают способностью при намагничивании изменять свои размеры. Это свойство и называется *магнитострикцией.*

Магнитострикционные преобразователи имеют вид сплошных или полых стержней с обмоткой, в которой течет переменный ток нужной частоты. Часто тело самого стержня набирается из тонких изолированных друг от друга пластин (рис. 19).

Магнитострикционные преобразователи применяются в тех случаях, когда нужно получить ультразвук сравнительно низких частот, приближающихся к частоте слышимых звуков. Для получения же высокочастотных ультразвуковых волн наиболее эффективны пьезоэлектрические излучатели. Для приема ультразвуковых колебаний также более удобно применять пьезоэлектричество. По сравнению с магнитострикционными пьезоэлектрические приемники гораздо чувствительнее. Поэтому часто делают комбинированные приемо-излучающие системы. Излучатель в таких системах магнитострикционный, а приемник пьезоэлектрический.

ШУМОПЕЛЕНГАТОРЫ

С установкой на надводных кораблях гидролокаторов, способных обнаружить подводные лодки в погруженном состоянии, соперничество между надводными кораблями и подводными лодками не прекратилось. Теперь вопрос стоял так: кто кого раньше обнаружит. Если корабль будет обнаружен первым, то подводная лодка сможет своевременно уклониться и избежать атаки. Более того, учитывая, что дальность действия гидролокатора ограничена; подводная лодка смогла бы еще до обнаружения ее применить смертоносные торпеды по кораблю противника.

Перископ, долгое время бывший основным и единственным средством наблюдения на подводной лодке, не позволял решить этих задач. Применение перископа демаскировало подводную лодку и лишало ее основного преимущества — скрытности. К тому же перископом нельзя было пользоваться при плохой видимости — ночью, в тумане, при густом снегопаде или дожде.

И вот на подводных лодках появились новые приборы наблюдения — шумопеленгаторы — устройства, определяющие направление на источник шума.

Как уже упоминалось, звук в воде распространяется на значительно большие расстояния, чем в воздухе. Еще знаменитый итальянский ученый Леонардо да Винчи говорил, что при помощи погруженной в воду трубы

можно обнаружить далеко идущие корабли. Во времена Леонардо да Винчи были только парусные корабли. Но и они при своем движении создавали шум, вызванный трением корпуса корабля о поверхность воды. С появлением винтовых судов главным источником шума стал гребной винт.

Свойство звука распространяться в воде на значительные расстояния лежит в основе шумопеленгатора. Для обнаружения шумов в корпус подводной лодки вделываются пьезоэлектрические приемники. Звуковые волны воздействуют на мембрану приемника, в результате чего звуковые колебания преобразуются в переменный электрический ток, который после усиления вновь преобразуется в звуковые волны (рис. 20).

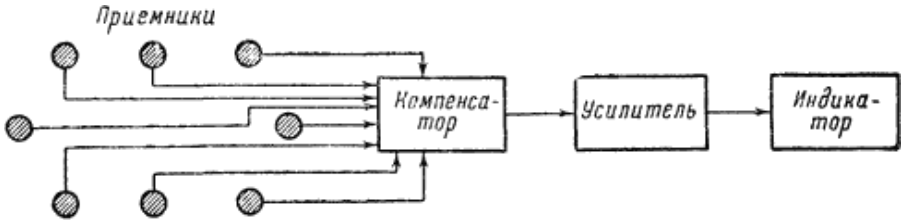


Рис. 20. ***Упрощенная схема шумопеленгатора***

В современных шумопеленгаторах принятые звуковые волны можно не только прослушать, но и просмотреть на экранах электронно-лучевых трубок.

Для точного измерения направления на шумящий предмет в корпус подводной лодки вделывается несколько пьезоэлектрических приемников. Располагаясь по кругу или эллипсу, они образуют приемную базу (рис. 21). Чем больше размеры базы, тем больше точность измерения направления на источник шума, т. е. точность пеленгования.

Для обследования пространства и определения направления на шумящий объект применяется специальное устройство, называемое *компенсатором.* Оно позволяет «поворачивать» базу в разные стороны и по максимальной громкости принятого шума определять направление на него.

Достоинства шумопеленгаторов очевидны. В отличие от гидролокаторов они являются пассивным средством наблюдения: шумопеленгатор не излучает никаких звуков, Поэтому обнаружить его работу невозможно. А эго очень важно для подводной лодки, так как сохраняется ее основное преимущество — скрытность. Дальность обнаружения целей у шумопеленгаторов значительно больше, чем у гидролокатора.

Рис. 21. ***Акустическая база подводной лодки***

И еще одним ценным свойством обладают шумопеленгаторы. При помощи этих приборов опытный специалист-гидроакустик может не только определить направление на шумящий объект, но и классифицировать шум, т. е. определить, какой класс корабля обнаружен. Более того, опытный гидроакустик по характеру шума может определить скорость корабля.

Однако шумопеленгатор имеет и существенные недостатки: он не может измерять расстояние до обнаруженной цели и обнаруживать нешумящие объекты.

В ряде зарубежных Флотов шумопеленгаторы применяются не только на подводных лодках, но и в качестве береговых неподвижных станций для обнаружения подводных лодок противника вблизи крупных военно-морских баз и портов. Приемная база такой станции расположена поблизости от побережья на дне моря и при помощи кабелей связана с приборами, находящимися на берегу. Здесь используются самые большие приемные базы и наиболее чувствительные приемники, позволяющие обнаружить подводную лодку на значительном расстоянии (рис. 22).

В конце второй мировой войны появились торпеды с акустической-головкой самонаведения. Основной частью этой головки был шумопеленгаторный приемник. При помощи электромеханической схемы шумы, преобразованные в электрические сигналы, воздействовали на приборы управления торпедой и направляли ее в кормовую часть корабля (рис. 23).

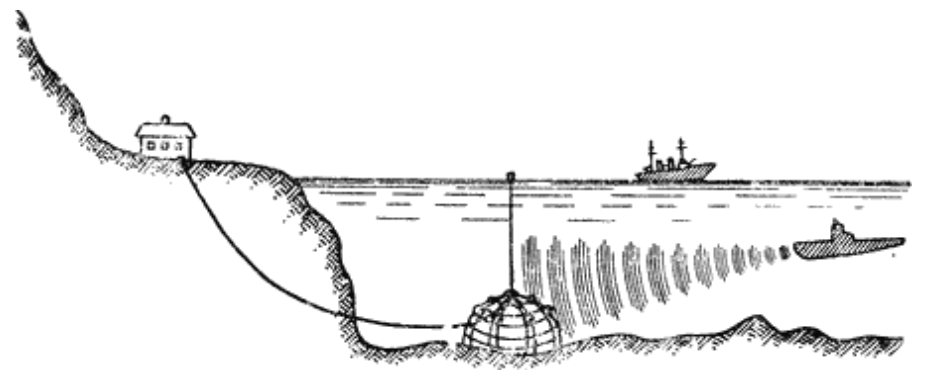


Рис. 22. ***Береговая шумопеленгаторная станция***

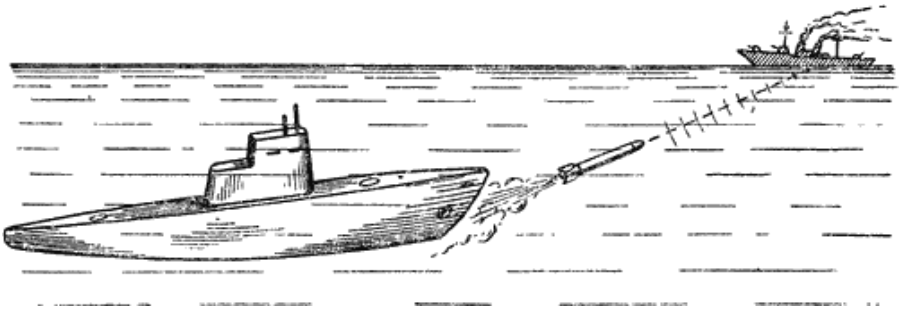


Рис. 23. ***Акустическая торпеда направляется на источник шума***

На надводных кораблях некоторых флотов также устанавливаются шумопеленгаторные станции. Однако применение их затруднено, так как при своем движении корабль создает большие шумовые помехи. Поэтому надводный корабль может эффективно использовать шумопеленгатор только при застопоренном ходе.

ГИДРОЛОКАТОР СЕГОДНЯ

Гидролокатору, сконструированному Ланжевеном и его сотрудниками, не было суждено принять участия в борьбе с немецкими подводными лодками: первая мировая война к этому времени уже закончилась. Однако работы по усовершенствованию средств обнаружения подводных лодок не прекращались.

За короткий исторический срок подводные лодки стали ведущим родом военно-морских сил. В результате бурного развития науки и техники чрезвычайно выросли возможности подводного флота. Атомные подводные лодки, например, могут плавать по всем морям и океанам, неделями не всплывая на поверхность. Значительно увеличились скорость и глубина погружения подводных лодок. Их стали вооружать атомным и ракетным оружием.

Усиление мощи подводных лодок заставило непрерывно совершенствовать средства борьбы с ними и в первую очередь средства обнаружения. На помощь гидролокатору пришла радиолокация. Появились и другие приборы для обнаружения подводных лодок.

Однако по-прежнему одним из основных средств поиска и обнаружения подводных лодок остается гидролокатор. Только гидролокационные приборы могут обнаружить подводную лодку, совершенно невидимую на поверхности воды.

Современные гидролокационные станции прошли большой путь непрерывных усовершенствований и стали малопохожими на своих предшественниц.

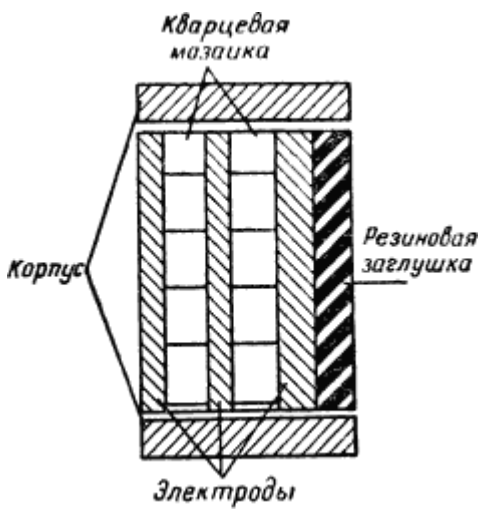


Рис. 24. Устройство пьезоэлектрического вибратора

Для увеличения мощности излучатель современного гидролокатора имеет уже несколько слоев пьезоэлектрической мозаики. Каждый слой находится между стальными электродами, которые одновременно служат и мембранами излучателя. Слои мозаики и электроды склеены между собой специальным клеем и помещены в металлический корпус (рис. 24). Чтобы противостоять ржавчине, корпус излучателя изготовлен из специального сплава меди, никеля и алюминия, называемого куниалом.

Для излучения ультразвука только в одном направлении на одном из внешних электродов ставят резиновую заглушку, не пропускающую звуковых волн. В некоторых случаях вместо резиновой заглушки между корпусом и электродом оставляют воздушную прослойку.

Для получения более узких пучков ультразвуковых волн за рубежом в гидролокаторах применяется специальное устройство, называемое отражателем или рефлектором. Пьезоэлектрический излучатель помещают в центре отражателя (рис. 25). Звуковые или ультразвуковые волны, излучаемые вибратором, отражаясь от стенок отражателя, образуют узкий пучок лучей. Дальность действия гидролокатора при этом увеличивается.

Преобразователь гидролокатора помещается в специальном устройстве, называемом обтекателем, и устанавливается в носовой части днища корабля (рис. 26). Обтекатель уменьшает помехи, вызываемые завихрениями воды, а также предохраняет вибратор от повреждений в случае ударов о подводные препятствия.

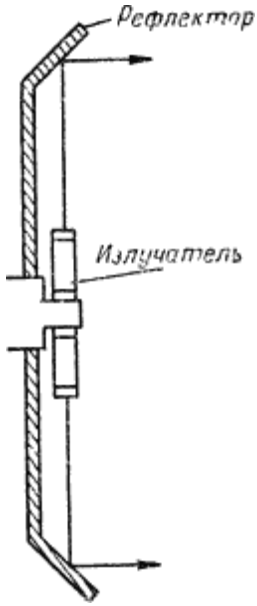


Рис. 25. Рефлектор позволяет создать узкий пучок звуковых лучей

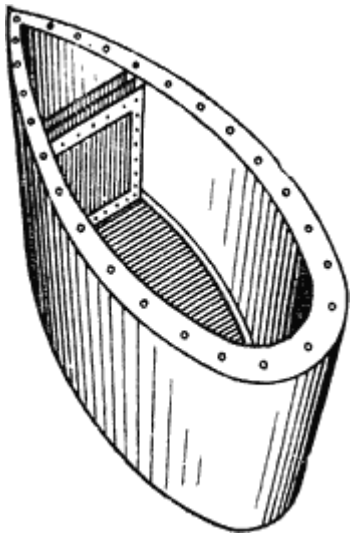


Рис. 26. Обтекатель гидролокатора

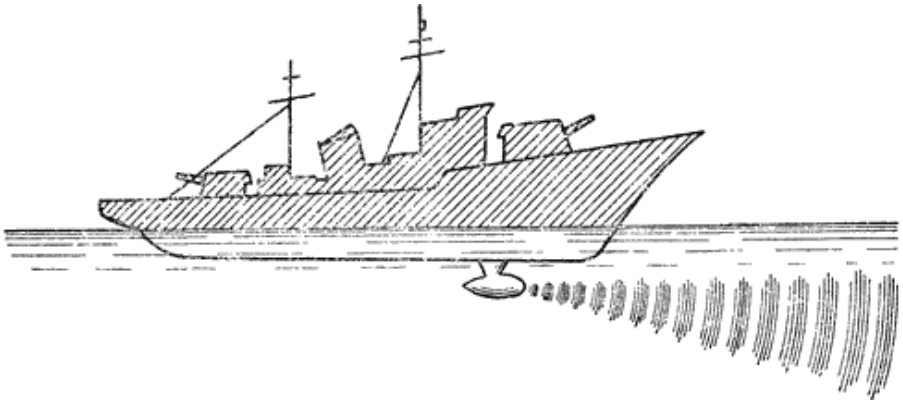


Рис. 27. Чаще всего обтекатель делают каплеобразной формы

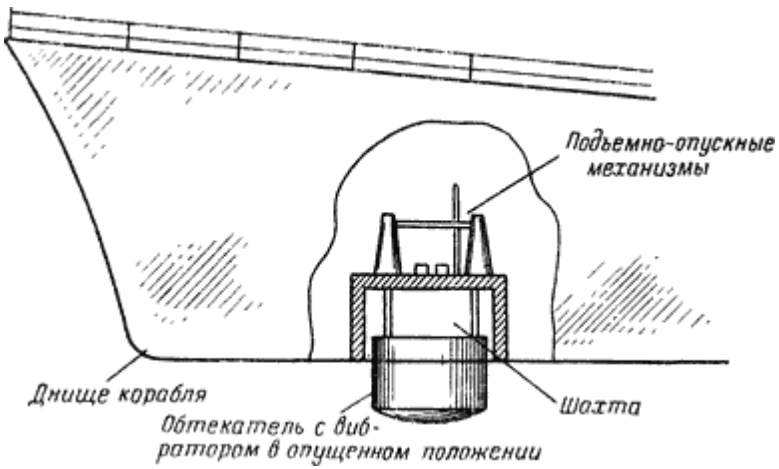


Рис. 28. Обтекатель помещается в специальной шахте и может опускаться и подниматься

Чтобы уменьшить завихрения, обтекатель делают каплеобразной, обтекаемой формы (рис. 27). Отсюда и появилось название обтекатель. Обтекатель с преобразователем называют *акустической системой.*

Чаще всего обтекатель с преобразователем может выдвигаться и убираться в специальную шахту внутри корабля. Дело в том, что при движении корабля на его днище образуются воздушные пузырьки, затрудняющие прохождение ультразвука. С удалением от корпуса корабля число пузырьков уменьшается. Бот почему обтекатель и делают выдвигающимся (рис. 28).

Чем мощнее колебания излучателя, тем больше дальность действия гидролокатора, а следовательно, и дальность обнаружения подводной лодки. Для создания мощных колебаний необходимо к электродам излучателя подключать электрическое напряжение значительной величины, которое создается специальным генератором. При работе гидролокатора на передачу преобразователь подключается к генератору. В паузах между очередными посылками ультразвука преобразователь подключается к усилителю. Роль переключателя выполняет реле приема — передачи (рис. 29).

Принятые эхосигналы усиливаются усилителем и преобразуются из неслышимых ультразвуков в обычные звуки, которые прослушиваются при помощи репродуктора или телефонных наушников. В современных гидролокаторах принятые сигналы можно еще просмотреть на экранах электронно-лучевых трубок. Упрощенная схема гидролокатора приведена на рис. 29.

По данным зарубежной печати, для поиска подводных лодок применяются вертолеты с опускающимися на длинном стальном троссе акустическими системами (рис. 30). Все остальные приборы гидролокатора находятся в кабине вертолета. Совершая полет над водной поверхностью, вертолет время от времени зависает, опускает акустическую систему и обследует подводное пространство.

Гидролокатор есть и на подводной лодке. Здесь он используется для измерения расстояния до цели, по которой производится торпедная атака. Кроме того, гидролокатор предупредит подводную лодку о минном заграждении или другом подводном препятствии.

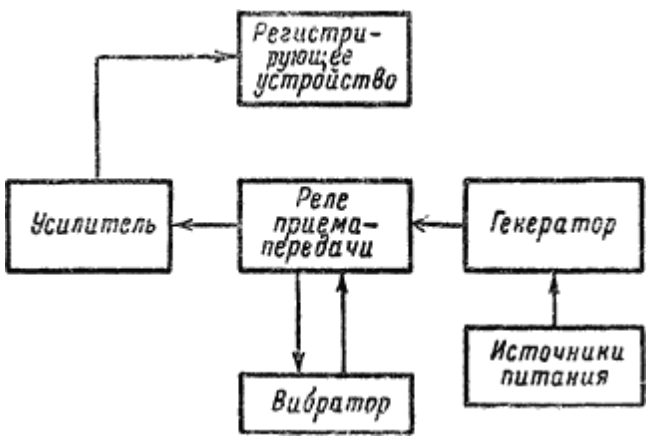


Рис. 29. Упрощенная схема гидролокатора

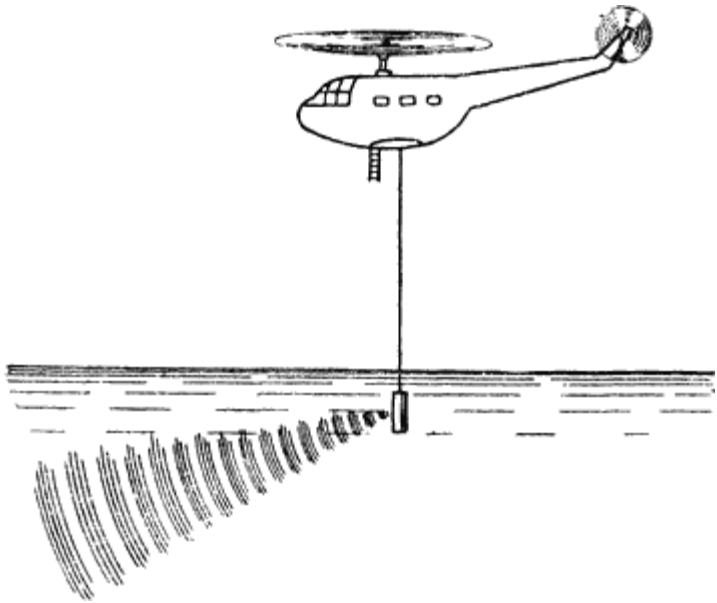


Рис. 30. Использование гидроакустических приборов с вертолета

Гидролокатор — это активное средство наблюдения. Для обнаружения целей гидролокатор должен излучать ультразвук, который может быть услышан находящимися поблизости вражескими кораблями. Поэтому подводники очень осторожно используют гидролокационную станцию, соблюдая скрытность.

ПОДВОДНАЯ СВЯЗЬ

Пьезоэлектрические преобразователи применяются и в гидроакустических приборах звуковой и ультразвуковой подводной связи. В конце второй мировой войны подводные лодки, долгое время действовавшие в одиночку, стали вести боевую деятельность в составе групп. Такие действия позволяли быстрее находить корабли противника, а также увеличивали мощь торпедного удара.

Но как управлять подводными лодками группы, если они большую часть времени находятся под водой? Ведь радиоволны не проникают сквозь многометровую толщу морской воды. На помощь пришли гидроакустические приборы подводной связи. Они позволили подводным лодкам, находящимся за многие километры друг от друга, поддерживать между собою связь — передавать команды, сведения о своих действиях, результаты наблюдения за противником и другие данные. Приборы подводной связи позволяют также подводной лодке вступать в связь с надводным кораблем, не всплывая на поверхность.

В основе устройства приборов подводной связи лежит тот же принцип, что и у гидролокатора. Более того, любой гидролокатор можно использовать для подводной связи. Если на одном корабле гидролокатором излучать ультразвуковые сигналы, то на другом корабле в режиме приема гидролокатор будет принимать сигналы первого. Включая генератор гидролокатора при помощи телеграфного ключа, можно передать определенное сообщение.

По данным зарубежной печати, в настоящее время специальные приборы ультразвуковой или звуковой подводной связи работают как в направленном, так и в ненаправленном режиме. Эти приборы могут передавать телеграфные и телефонные сообщения. При необходимости командир одной подводной лодки может по телефону переговорить с командиром другой подводной лодки.

Упрощенная схема станции подводной связи изображена на рис. 31. В приборах подводной связи применяются преобразователи ненаправленного действия, способные излучать звуковые волны во все стороны равномерно. Они устроены следующим образом.

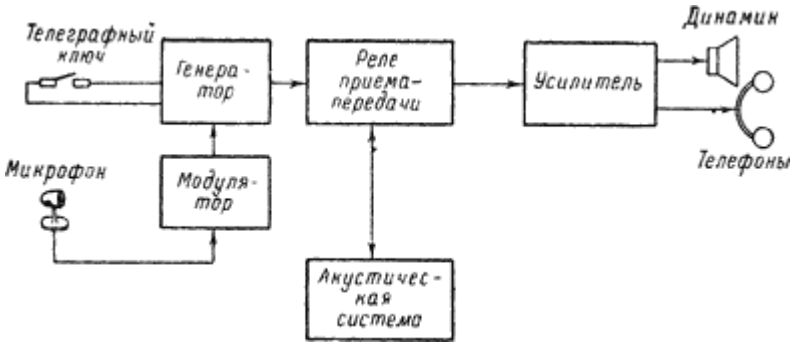


Рис. 31. Упрощенная схема станции подводной связи

На полую металлическую трубку, служащую как бы стержнем, надевают несколько пьезоэлектрических колец из титаната бария (рис. 32). Электродами пьезокерамики является тонкий слой металла, обычно серебра, покрывающий внутреннюю и внешнюю поверхности колец. Одноименные электроды при помощи проводов соединяются последовательно между собой. Все устройство помещается в звукопрозрачный кожух и размещается в обтекателе.

Рис. 32. Акустический преобразователь ненаправленного действия

РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ БУИ

В семействе гидроакустических приборов вы найдете и очень маленькие по размерам шумопеленгаторы и гидролокаторы. Они применяются в радиогидроакустических буях — новом средстве обнаружения подводных лодок, появившемся после второй мировой войны. Это небольшие цилиндры, внутри которых размещается взаимосвязанная гидроакустическая и радиопередающая аппаратура.

Радиогидроакустические буи могут применяться морской авиацией — самолетами и вертолетами. Можно их устанавливать и с надводных кораблей. Наиболее распространены буи пассивного действия, где в качестве гидроакустической аппаратуры применяется шумопеленгаторная станция с пьезоэлектрическим приемником ненаправленного действия. В корпусе буя, который обладает положительной плавучестью, т. е. способен плавать на поверхности моря, размещаются радиопередатчик с антенной, модулятор и усилитель (рис. 33). Пьезоэлектрический приемник, электрически связанный с усилителем, размещается в нижней части буя. Такие буи устанавливаются в опасных от подводных лодок районах. Обычно устанавливается несколько радиогидроакустических буев.

Как только подводная лодка окажется в зоне обнаружения, приемник начнет принимать шумы подводной лодки, которые преобразуются в электрические сигналы, а затем излучаются в пространство в виде электромагнитных волн.

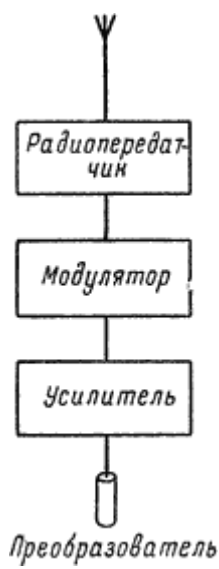


Рис. 33. Блок-схема радиогидроакустического буя пассивного действия

На самолете или корабле, поставившем буи, непрерывно несется вахта на приемниках, настроенных на частоту передатчика буя. Услышав сигнал работающего буя, определяют направление на него, и в район местонахождения подводной лодки направляют корабли и самолеты для ее уничтожения.

Такие буи называют дрейфующими радиогидроакустическими буями, время действия их ограничено, и они самозатапливаются.

В зарубежных флотах применяются и стационарные радиогидроакустические буи, местоположение которых с течением времени не меняется. Общий вид стационарного буя показан на рис. 34. Стационарные буи бывают как пассивного, так и активного действия. В активном буе вместо приемника шума применена миниатюрная гидролокационная станция, которая после установки буя автоматически включается и обследует водное пространство. Сигналы, принимаемые гидролокатором, запускают радиопередатчик, который посылает в эфир сообщение об обнаружении подводной лодки.

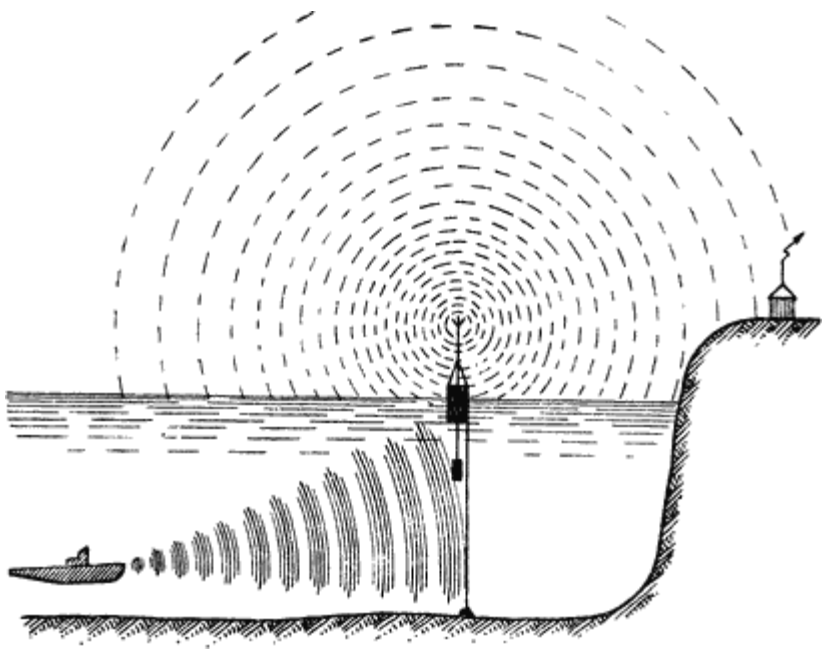


Рис. 34. Стационарный радиогидроакустический буй

Стационарные радиогидроакустические буи в отличие от дрейфующих буев могут находиться в море длительное время. Ни течение, ни ветер не снесет буй с места, так как он стоит на якоре. Обычно стационарные буи устанавливаются далеко в море и предназначены для обнаружения подводных лодок в дальней зоне.

ГОВОРЯЩИЙ КРИСТАЛЛ

Как вы уже убедились, электрический преобразователь необходим для приема звуковых волн. Но пьезоэффект обратим. Поэтому пьезоэлектрический преобразователь может быть использован и при воспроизведении принятых звуков, например, в телефонных наушниках или репродукторах. Пьезоэлектрические телефоны очень чувствительны и хорошо воспроизводят все слышимые ухом звуки.

Однако воспроизведение звука — область не гидроакустики, а *электроакустика* — науки, занимающейся электрической записью и воспроизведением звуковых колебаний. В этой науке пьезоэлектричеству также отведена не последняя роль.

Возьмите пьезоэлектрические телефонные наушники. В каждом из них вы найдете так называемый пьезоэлемент, состоящий из пластинок сегнетовой соли.

А теперь рассмотрим, как работает такой пьезоэлемент. Дело в том, что пьезоэлементы, применяемые в электроакустических приборах, существенно отличаются по своему устройству от пьезоэлектрических пластинок в вибраторах и приемниках гидроакустических станций. Если там пластинки работали на сжатие — растяжение, то здесь они работают на изгиб, кручение и смещение. Этим достигается максимальная чувствительность пластинки.

Пьезоэлектрическую пластинку можно вырезать так, чтобы под воздействием электрического тока она либо удлинялась, либо укорачивалась. Если снабдить две такие пластинки электродами и склеить между собой, то получим так называемый *биморфный элемент*. Склеивать пластинки нужно так, чтобы при укорочении одной другая удлинялась и наоборот.

Если теперь подвести к электродам переменный ток, то весь элемент в целом будет изгибаться в ту или иную сторону в зависимости от знака зарядов на электродах. Такой биморфный элемент называется *пьезоэлементом изгиба* (рис. 35, *а)*.

А как сделать пьезоэлемент, работающий на кручение? Для этого из целого кристалла надо вырезать брусок так, чтобы под воздействием электрического тока противоположные углы бруска смещались в разные стороны. Если склеить два таких бруска и закрепить неподвижно один конец, то получим биморфный *пьезоэлемент кручения* (рис. 35, б).

Если оставить свободным один конец такого пьезоэлемента, а остальные три закрепить, то получим *пьезоэлемент смещения* (рис. 35, *в)*

Теперь станет понятно, как работают пьезоэлектрические телефонные наушники, или, как часто их называют, телефоны. Здесь чаще всего используется пьезоэлемент смещения. Свободный конец элемента соединяется с конической мембраной. Переменный ток, подведенный к пьезоэлементу, вызывает колебания свободного конца, которые передаются мембране. Если ток изменяется со звуковой частотой, то будет слышен звук.

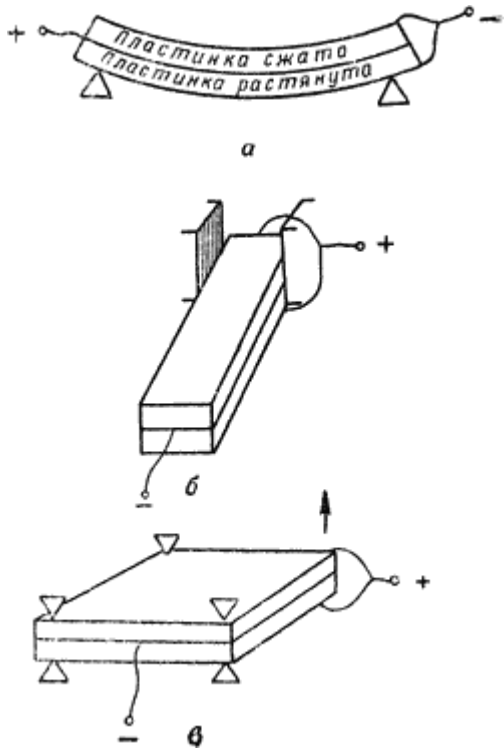


Рис. 35. Биморфные пьезоэлементы:

а — изгиба, б — кручения; в — смещения

Подводная лодка вышла в море на выполнение боевого задания. Непрерывно несется вахта на шумопеленгаторной станции. Внимательно прослушивает водное пространство специалист-гидроакустик. Но что это? Еле слышный шорох в наушниках, потом громче, громче… Конечно! Шум винтов боевого корабля противника! Надо немедленно доложить об этом командиру!

И снова на помощь приходит пьезоэлектричество. Ведь

микрофоны громкоговорящей связи, соединяющей командира и гидроакустика, тоже используют это явление.

В пьезоэлектрических микрофонах — приборах, служащих для превращения звука в электрические колебания звуковой частоты, применяются биморфные элементы, работающие на изгиб. Микрофон может состоять из одного или двух элементов. Для повышения чувствительности к пьезоэлементу иногда присоединяют металлическую диафрагму (рис. 36).

Существует еще одна область электроакустики, где широко применяются пьезоэлектрические устройства. Это запись звука и в частности звукосниматели для передачи и воспроизведения граммофонной записи.

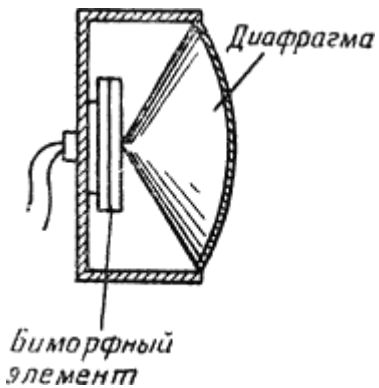


Рис. 36. ***Пьезоэлектрический микрофон с диафрагмой***

Граммофонная пластинка состоит из еле видимых бороздок с извилинами. Это записан звук. Для воспроизведения его по бороздкам движется игла звукоснимателя. Следуя по извилинам, игла колеблется со звуковой частотой. Колебания иглы передаются пьезоэлектрической пластинке и преобразуются в электрический ток такой же частоты. Впоследствии ток усиливается и поступает на громкоговоритель.

Обычно в пьезоэлектрических звукоснимателях применяют один биморфный элемент, работающий на кручение. Однако существуют звукосниматели и с пьезоэлементом изгиба.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХОЛОТ

Работы над пьезоэлектричеством и ультразвуком натолкнули ученых на мысль об использовании гидролокатора в качестве *эхолота* — прибора для измерения глубины моря.

Раньше глубину моря определяли обыкновенным тросом, на конце которого был прикреплен груз. Лот — так называлось это приспособление — опускался с борта корабля до соприкосновения груза с морским дном. По длине опускаемой части лота и судили о глубине моря.

Ясно, что такие измерения занимали очень много времени, особенно при больших глубинах моря. Точность определения глубины была чрезвычайно низка, так как за время опускания и подъема лота корабль сносило на значительное расстояние. Кроме того, при помощи лота нельзя было определять глубину на ходу корабля.

Всех этих недостатков лишен эхолот. Этот прибор похож на гидролокатор. Различие состоит в том, что ультразвуковой луч эхолота направлен вертикально вниз, к морскому дну. Как и у гидролокатора, пьезоэлектрический излучатель эхолота посылает ультразвуковые сигналы, а в паузах между посылками принимает отраженное от дна эхо (рис. 37, *а)*.

Посылки производятся через определенные промежутки времени. Момент посылки регистрируется на специальной ленте, которая движется с постоянной скоростью. Отраженный от дна эхосигнал принимается, усиливается и также регистрируется на этой ленте (рис. 37, *б)*. Чем больше расстояние между двумя отметками, тем больше глубина моря в той точке, где производилось измерение. На ленте нанесен специальный масштаб, а скорость движения пера, ставящего метки на бумаге в момент прихода эхосигналов, пропорциональна скорости распространения звука в воде. Ультразвуковой луч может нащупать малейшее изменение рельефа морского дна. Поэтому по записи на ленте определяют глубину моря.

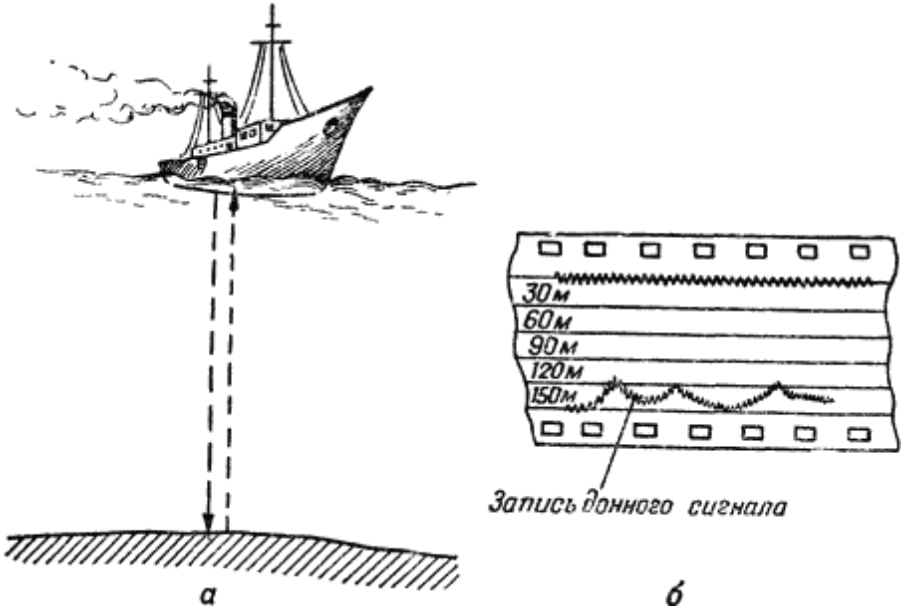


Рис. 37. Ультразвуковой эхолот:

а — принцип действия; б — лента эхолота с записью

При помощи эхолота в настоящее время составлены подробные карты морских глубин, по которым корабль может определить свое местоположение в море.

Точность работы эхолота достаточно велика: с его помощью, например, удалось обнаружить лежащий на дне большой океанский пароход «Лузитания», потопленный немецкой подводной лодкой во время первой мировой войны. На рис. 38 приведена лента с записью эхолота. На фоне ровного профиля морского дна четко вырисовывается силуэт корабля с надстройками.

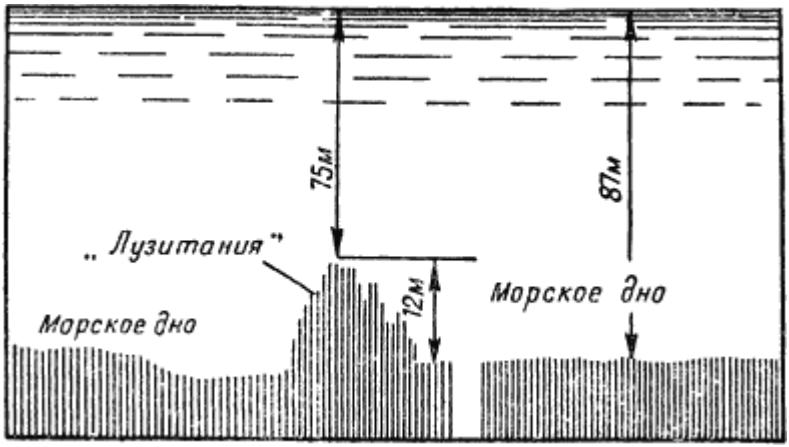


Рис. 38. Запись эхолота, на которой видны контуры затонувшего корабля

Эхолот с успехом применяется в рыбном промысле. Установлено, что рыбы отражают ультразвук. Это дает возможность при помощи эхолота обнаруживать в море или океане косяки рыб.

Ранее уже упоминалось, что рыбы погибали от ультразвука. Но те опыты проводились в бассейне с мощными источниками ультразвука, действующего на рыб на небольшом расстоянии в течение длительного времени. Рыбам в море такая опасность не грозит.

ЕЩЕ ОДНО ЧУДЕСНОЕ СВОЙСТВО

Замечательные свойства пьезокристаллов обусловили их широкое применение и в ряде других отраслей, например в радиолокации.

В основу радиолокации положен тот же принцип, что и в гидролокации, т. е. принцип отражения эхо-сигналов. Только здесь применяются уже не ультразвук, а радиоволны. Они излучаются передатчиком и при помощи антенны узким пучком направляются в пространство. В паузах между излучениями к антенне подключается приемник, который усиливает отраженные от целей радиоволны и направляет их в индикатор. В индикаторе принятые сигналы просматриваются на экранах электронно-лучевых трубок, а по времени прихода отраженных сигналов определяется расстояние до цели (рис. 39).

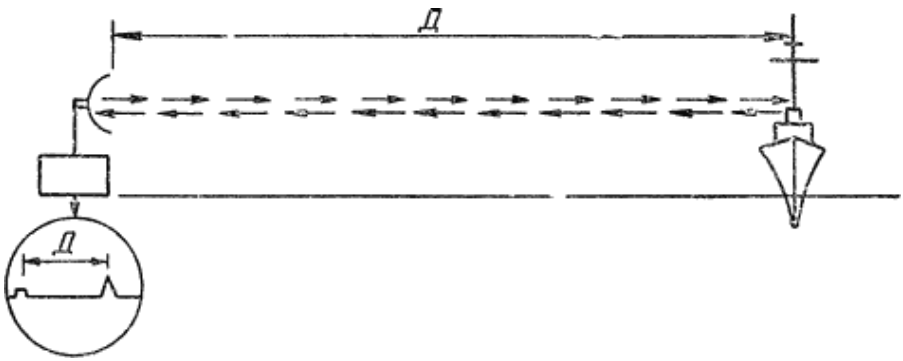


Рис. 39. ***Принцип работы радиолокатора***

Так коротко можно объяснить работу радиолокатора. Однако за каждым названием отдельных узлов радиолокационной станции, таких, как передатчик, индикатор и другие, скрыты тысячи разнообразных и остроумных устройств и деталей. И все они работают в строго согласованном порядке. Такое согласование в радиолокации называется *синхронизацией,* а прибор, согласующий работу отдельных блоков и устройств, — *синхронизатором.*

Синхронизатор — это «командир» радиолокационной станции (рис. 40). Без его «приказа» не начнет работать ни одно устройство. На остановку работы того или иного блока также требуется «разрешение» синхронизатора.

«Приказы» синхронизатора представляют собой электрические сигналы, следующие друг за другом с чрезвычайно постоянной частотой. Стоит лишь немного измениться частоте следования этих сигналов, как работа всей станции нарушится.

Как же создать такое постоянство, или, как чаще говорят, стабильность частоты следования электрических сигналов?

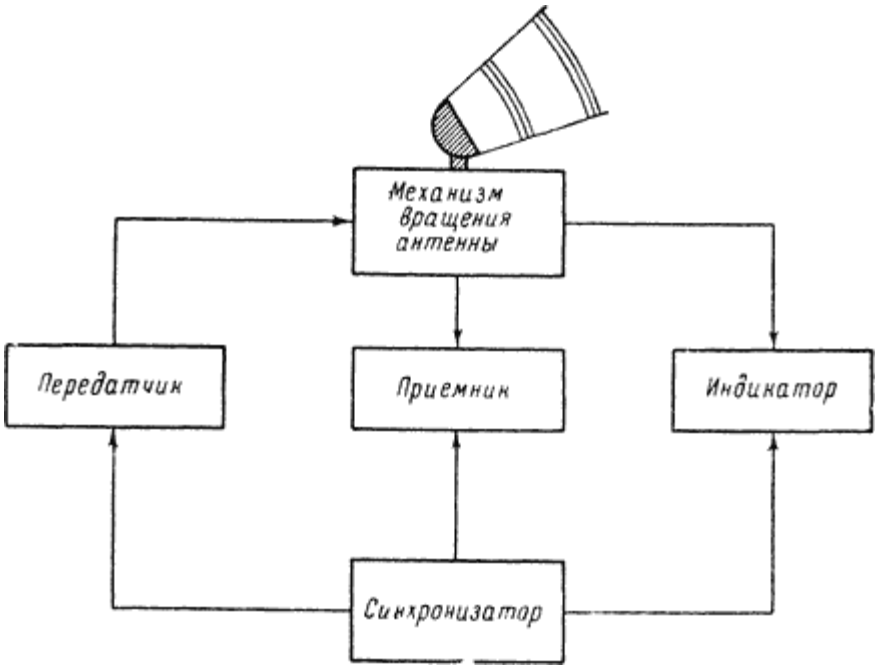


Рис. 40. Упрощенная схема радиолокационной станции

На помощь пришло пьезоэлектричество. Оказалось, что наиболее эффективным из всех способов повышения стабильности частоты является кварцевая стабилизация, а точнее — стабилизация при помощи кварцевых резонаторов.

Прежде всего вспомним основные законы колебательного движения. Для этого обратимся к обыкновенному маятнику — небольшому грузику, подвешенному на качающемся стержне или нитке. Достаточно слегка качнуть его, как начнутся постепенно затухающие колебания. Частота таких колебаний зависит только от размеров маятника и называется *собственной.*

Почему колебания затухают? Куда расходуется энергия, которую мы сообщили грузику, толкнув его? Ответ прост: на трение и преодоление сопротивления движению маятника со стороны окружающей среды. Встречая эти силы при своем

движении, маятник постепенно, порцию за порцией, отдает весь сообщенный ему запас энергии — колебания затухают, маятник останавливается.

Подобно маятнику колебательной системой является тонкая кварцевая пластинка, снабженная электродами. Однако по сравнению с любым маятником кварцевая пластинка представляет собой куда более совершенную колебательную систему. Маятник после толчка может еще колебаться десятки раз. А если заставить колебаться кварцевую пластинку, то она проделает сотни тысяч колебаний, прежде чем израсходует свою энергию.

Но что самое примечательное: собственная частота пластинки при этом остается строго постоянной, даже если ее нагревать или охлаждать.

Например, если нагреть пластинку на один градус, частота изменится всего лишь на одну стотысячную долю процента. Вот почему для стабилизации частоты используется пьезокварц. Благодаря своим упругим свойствам, высокой температурной и химической устойчивости кварцевая пластинка наиболее совершенна из всех колебательных систем.

Как же привести кварцевую пластинку в колебательное движение? Если маятник начинает двигаться от толчка руки, то здесь «толчок» создается переменным электрическим током, подведенным к электродам. Переменный ток создает периодические сжатия и растяжения — кварцевая пластинка колеблется. Не любой переменный ток способен возбудить собственные колебания пластинки. Это делает только ток, частота которого совпадает с частотой собственных колебаний пластинки или близка к ней.

Возвратимся к радиолокационной станции. Как в ней осуществляется синхронизация?

Главной частью синхронизатора станции является так называемый задающий генератор, вырабатывающий электрический ток строго постоянной частоты. В одну из цепей генератора включена кварцевая пластинка. Частота вырабатываемого тока равна собственной чистоте пластинки.

Если по какой-либо причине частота генератора изменится, кварцевая пластинка будет продолжать колебаться с прежней частотой. Эти колебания будут навязаны и генератору, частота колебаний которого возвратится к прежней величине. Иначе говоря, кварцевая пластинка будет стабилизировать частоту генератора.

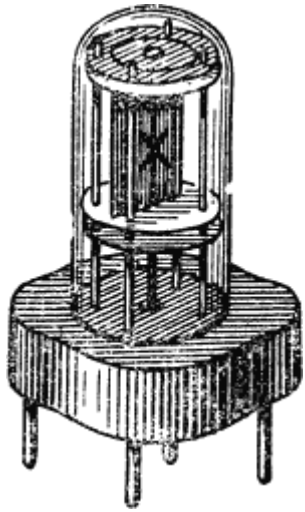


Рис. 41. ***Высокостабильный кварцевый резонатор***

Переменный ток, выработанный задающим генератором, преобразуется в электрические сигналы специальной формы. Эти сигналы поступают в другие блоки радиолокационной станции и синхронизируют ее работу.

Собственная частота кварцевой пластинки определяется ее размерами, главным образом толщиной. Чем тоньше пластинка, тем выше ее частота.

Кварцевая пластинка снабжается электродами и помещается в герметический корпус. Такое устройство и называется кварцевым резонатором, или *стабилизатором.*

В некоторых случаях, когда необходима очень высокая стабильность частоты, кварцевую пластинку помещают в стеклянный или металлический баллон, из которого выкачивают воздух (рис. 41). В таких резонаторах колебания исключительно постоянны, так как разреженный воздух оказывает меньшее сопротивление колебаниям пластинки.

Кварцевая стабилизация частоты применяется не только в радиолокации. Не менее важна она в радиосвязи и радиовещании, где стабилизируются мощные электрические колебания радиопередатчиков.

Включите радиоприемник и поверните ручку настройки. Даже за небольшой поворот вы услышите работу нескольких десятков станций. Однако, настроив приемник на частоту какой-либо определенной станции, вы слушаете только ее передачу. Но что произойдет, если частоты работающих станций не будут

стабильны? Радиостанции будут создавать взаимные помехи, «наезжать» друг на друга. В этом случае нечего и говорить о хорошем приеме.

Резонансные свойства пьезокварца используются и в радиоприемных устройствах. Здесь применяют кварцевые *фильтры*.

Если на вход приемника подключена кварцевая пластинка, в него попадут только те электрические колебания, частоты которых совпадают с резонансной частотой пластинки. Все остальные колебания будут отсеены. А раз так, то качество приема будет наилучшим. Про такой приемник говорят, что он обладает высокой избирательностью.

САМОЕ ТОЧНОЕ ВРЕМЯ

Ежедневно люди проверяют свои часы по радиосигналам точного времени. Услышав ритмичные щелчки и следующие за ними сигналы, вы невольно смотрите на свои часы и, если разница хода часов и сигнала значительная, спешите перевести стрелки.

Для личных нужд точность хода ручных, карманных и стенных часов вполне достаточная. Да вы на своих часах и не заметите погрешность меньше секунды. Но для научных и технических целей такая точность далеко недостаточна. При этом разнообразие отраслей науки и техники, где необходимо точное время, так велико, что перечислить их все практически трудно. Вот наиболее важные из них.

Воздушная и морская навигация. Здесь точное время необходимо для определения места и прокладки курса кораблей и самолетов. Если полет или плавание происходит вне пределов действия радиомаяков и вдали от побережья, местоположение корабля или самолета определяется по положению звезд и точному времени. Для этих же целей точное время необходимо в геодезии и картографии — науках, занимающихся изучением строения земной поверхности и составлением карт.

Космонавтика. Здесь точное время крайне необходимо. Ведь момент запуска ракеты должен соблюдаться с точностью до одной секунды. Ошибка в скорости космической ракеты должна быть не более нескольких метров в секунду. Но разве можно с такой точностью измерить скорость ракеты, составляющую свыше 11 километров в секунду, не зная точного времени?

В связи с запуском искусственных спутников Земли и проведением работ по программе Международного геофизического года теперь по радиостанциям Советского Союза вместо прежних сигналов ежечасно передаются сигналы точного времени, состоящие из шести коротких сигналов с интервалами в одну секунду. Погрешность этих сигналов не превышает 0,03 секунды.

Мы уже несколько раз упоминали слово погрешность. Вот и сейчас говорим, что «погрешность радиосигналов не превышает 0,03 секунды». Относительно чего определяется эта погрешность? Что является самой точной мерой, эталоном времени?

Единственными часами, с которыми сравниваются все прочие меры времени, является Земля. С давних пор в основу всего исчисления времени положена одна и та же единица времени — период вращения Земли вокруг ее оси. Однако для практических

нужд пользоваться этим временем невозможно, поэтому применяют часы, способные хранить единицу времени с наибольшей точностью.

В течение многих лет эту роль выполняли маятниковые часы специальной конструкции. Их называли астрономическими часами, потому что показания их проверяли при помощи астрономических наблюдений. Эти часы помещались в глубоких подвалах, где колебания окружающей температуры были незначительными. Часы укреплялись на столбах-фундаментах, уходящих глубоко в землю.

Такие часы давали удовлетворительную точность хода и были вполне пригодны для практики, если бы не было землетрясений. Землетрясения нарушали работу часов и точность их хода заметно снижалась.

На помощь пришла, как вы уже догадываетесь, знакомая нам кварцевая пластинка. Являясь наиболее совершенным из всех колебательных систем, кварцевый генератор создает электрические колебания исключительно высокой стабильности. Такие генераторы являются эталоном частоты. Высокостабильные генераторы и стали применять для хранения единицы времени.

Некоторым из вас известны так называемые синхронные электромоторы. Число оборотов их зависит от частоты переменного электрического тока, питающего мотор. Если частота питающего тока строго постоянна, то строго постоянно и число оборотов в единицу времени.

Подведем к такому мотору переменный ток, частота которого стабилизирована кварцевым резонатором, а вал электромотора соединим с часовыми стрелками при помощи зубчатого механизма. Все устройство в целом и будет называться *кварцевыми часами* (рис. 42). Такие часы будут спешить или отставать за сутки всего лишь на несколько десятитысячных долей секунды. Лучшие экземпляры кварцевых часов имеют исключительное постоянство хода: колебания суточного хода их не превышают 0,0001 секунды. Правда, прежде чем достигнуть такой точности хода, пришлось немало потрудиться.

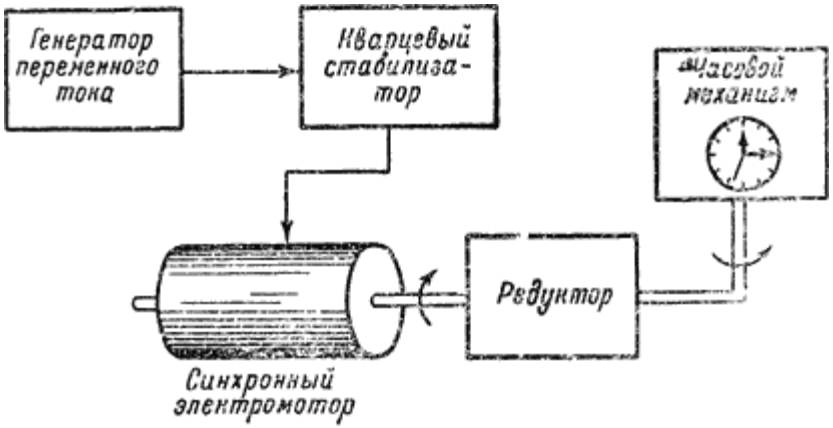


Рис. 42. Упрощенная схема кварцевых часов

Первое, что надо было сделать, — постараться уменьшить зависимость частоты, вырабатываемой кварцевым генератором, от изменений окружающей температуры. Для этого были исследованы многочисленные срезы кристаллов кварца и выбраны наименее зависимые от температуры. Кроме того, пластинки помещали в специальные термостаты, в которых поддерживалась постоянная температура: до нескольких долей градуса.

В Советском Союзе для этих целей группа кварцевых резонаторов была помещена в металлический цилиндр длиной 1,4 метра и диаметром 90 миллиметров. Цилиндр был опущен в подземную скважину на глубину 25 метров. Температура на этой глубине была исключительно постоянной. Как показали наблюдения, суточные отклонения колебаний у таких генераторов не превышают десятимиллионных долей процента.

Немало потрудились ученые и над явлением, называемым старением кварца. Дело в том, что в кристаллах кварца с течением времени происходят процессы, вызывающие самопроизвольное изменение частоты генераторов. Эти процессы еще полностью не изучены.

Для получения высокой стабильности частоты кварцевые пластинки подвергаются искусственному старению, для чего их многократно нагревают и охлаждают.

В короткий срок кварцевые часы получили широкое признание. Это самые точные часы, сконструированные человеком. Они дают возможность не только определять погрешность хода маятниковых часов, но и более точно изучать неравномерности вращения Земли.

ТВОРЧЕСКОЕ СОДРУЖЕСТВО

Пьезоэлектричество и ультразвук. На редкость плодотворным оказалось содружество этих физических явлений. Пьезоэлектрические приемники и излучатели ультразвука с успехом применяются в промышленности и народном хозяйстве.

Советский Союз стал родиной ультразвуковой дефектоскопии — области техники, занимающейся обнаружением изъянов в различных деталях («дефект» — недостаток, «скопео» — смотрю). В 1927 году советский ученый С. Я. Соколов предложил использовать ультразвуковые сигналы для обнаружения изъянов в металлических отливках.

Внутри металла дефекты невидимы для человеческого глаза, но не для ультразвука. Существуют два способа ультразвуковой дефектоскопии. Один из них основан на отражении ультразвуковых сигналов, другой называется способом сквозного прозвучивания.

Отражательный дефектоскоп в принципе не отличается от гидролокатора. Только вместо воды здесь металл, а вместо подводной лодки — дефект. Как и в гидролокаторе, кварцевая пластинка излучает «порцию» ультразвука, которая отражается от дефекта и в виде эхосигнала возвращается обратно. На экране электронно-лучевой трубки принятое кварцевой пластинкой эхо становится видимым, а зная скорость распространения звука в металле, можно определить место дефекта (рис. 43).

Еще проще способ сквозного прослушивания. Излучатель ультразвука прикладывается с одной стороны металлической детали. С противоположной стороны прикладывается приемник ультразвука.

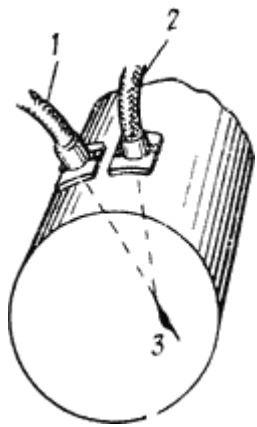


Рис. 43. Отражательный дефектоскоп:

1 — излучатель; 2 — приемник; 3 — дефект

Если деталь без изъянов, то ультразвуковой сигнал, пройдя толщу металла, воспринимается приемником, усиливается и стрелка индикатора отклоняется. Если же на пути луча встречается изъян, то в этом месте ультразвуковые колебания поглощаются, ультразвук не доходит до конца и стрелка прибора не отклоняется.

Дефектоскопы, использующие способ сквозного прослушивания, получили название теневых дефектоскопов. Поскольку они обычно работают же в импульсном режиме, устройство их значительно упрощается. Чаще всего теневые дефектоскопы применяют для контроля расслоения в тонких листовых материалах, контроля проволоки, проверки качества склеивания листов. Примеры применения теневых дефектоскопов приведены на рис. 44.

Трудно переоценить значение дефектоскопии в промышленности и народном хозяйстве. Ведь малейший дефект в ответственных деталях, таких, как коленчатый вал, может привести к выходу из строя всей машины. При помощи дефектоскопии можно проверить доброкачественность сварных швов и прочность железнодорожных рельсов. Достижения ультразвуковой дефектоскопии позволили не только заметить дефект, но и узнать его форму и размеры. Зоркий глаз дефектоскопа выявляет изъяны не только в металле, но и в бетоне, резине, пластмассе и других материалах.

В настоящее время большое распространение получили так называемые акустические методы Контроля состояния среды и измерения свойств вещества. При распространении ультразвука в среде он будет поглощаться. Величина поглощения зависит от свойств среды. Измерив при помощи чувствительного пьезокристалла величину этого поглощения, можно контролировать состояние и определять структуру различных сложных сред.

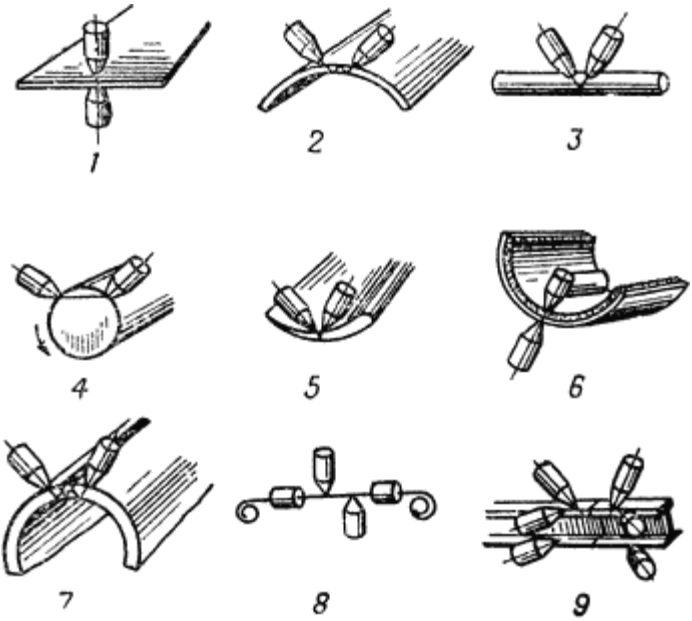


Рис. 44. ***Примеры применения теневого дефектоскопа для выявления:***

1 — расслоения листов; 2 — расслоения и трещин в резервуарах и котлах; 3 — качества спая проводов; 4 — трещин и разрывов в стержнях; 5 — трещин в турбинных лопатках; 6 — однородности заливки вкладышей подшипников; 7 — качества сварных швов; 8 — трещин проволоки; 9 — качества сварки рельсов

В атмосфере угольной шахты достаточно очень небольшого количества рудничного газа метана, чтобы произошел взрыв и пожар. На помощь пришел ультразвуковой контролер. Этот прибор сравнивает условия распространения ультразвука через исследуемый воздух и через тот же воздух, но очищенный от метана при помощи специального химического фильтра. По разности показаний стрелочного индикатора можно сразу определить процентное содержание метана.

Подобные ультразвуковые контролеры применяются и для проверки состояния твердых тел. Известно применение ультразвуковых колебаний для непрерывного наблюдения за отвердеванием и увеличением прочности бетонной кладки. Ценность этого способа в том, что нет необходимости для исследований этих процессов разрушать кладку, как это делалось раньше.

Ультразвук и пьезоэлектричество произвели переворот в технике пайки металлов. Беда заключалась в том, что многие цветные металлы, например алюминий, очень плохо паялись и

сваривались. Всему виной была тонкая пленка окислов, образующаяся на поверхности металла. Но если паять под непрерывным воздействием ультразвука, то пленка окислов разрушается и не восстанавливается. Качество пайки в таких условиях отличное.

Способность разрушать поверхностные пленки и слои позволила применять ультразвук для очистки накипи в паровых котлах, а также для очистки подводной части корабля от нежелательных обрастаний.

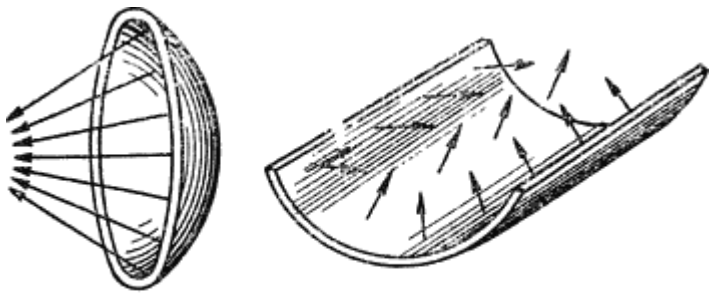
Применяется ультразвук и в химической промышленности, где ультразвуковые колебания размельчают в порошок очень твердые тела.

В сельском хозяйстве ультразвук повышает всхожесть семян многих растений и ускоряет сроки их вызревания.

Разнообразное применение ультразвука в промышленности и народном хозяйстве привело к созданию новых конструкций пьезоэлектрических излучателей и приемников. Для усиления ультразвукового излучения в последнее время стали применять фокусирующие излучатели. Рабочей поверхностью таких излучателей является отрезок сферы или цилиндра из титаната бария (рис. 45). Ультразвуковые волны, излученные такой поверхностью, собираются вблизи центра сферы или оси цилиндра.

Сферические фокусирующие излучатели создают большое усиление ультразвука на небольшой поверхности. Они применяются в тех случаях, когда нужно воздействовать ультразвуком на небольшой и неподвижный предмет.

Цилиндрические излучатели дают меньшее усиление, зато излучение создается в виде полосы, длина которой равна длине цилиндра. Эти излучатели применяются в тех случаях, когда облучение необходимо производить в режиме потока. В этом случае обрабатываемая деталь по конвейеру проходит в полосе облучения.



а *б*

Рис. 45. Фокусирующие излучатели из титаната бария:

а — отрезок сферы; б — отрезок цилиндра

Наряду с созданием новых конструкций излучателей разработаны новые пьезоэлектрические приемники ультразвука, позволяющие обнаружить и измерить ничтожные изменения звукового давления. Размеры пьезоэлектрических приемников могут быть самые различные.

Рассказ о содружестве ультразвука и пьезоэлектричества можно было бы продолжать еще долго. Мы остановимся лишь на одном замечательном достижении советской науки — ультразвуковом микроскопе.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МИКРОСКОП

Пожалуй, мало кому из вас не знаком оптический микроскоп. Но попробуйте с его помощью получить изображение предмета, скрытого от человеческого глаза толстым слоем непрозрачного вещества, или увидеть небольшой предмет в непрозрачной жидкости. Ясно, что для таких целей оптический микроскоп не подходит. Эту задачу успешно решает ультразвуковой микроскоп.

Изучая свойства ультразвука, ученые давно заметили, что с укорочением длины волны сходство ультразвуковых и световых волн возрастает. Ультразвуковая волна, так же как и световая, отражается и преломляется. Если световую волну можно сфокусировать в оптической линзе, то и ультразвук поддается фокусировке при помощи специальной ультразвуковой линзы. Такие линзы и применяются в ультразвуковом микроскопе для увеличения изображения.

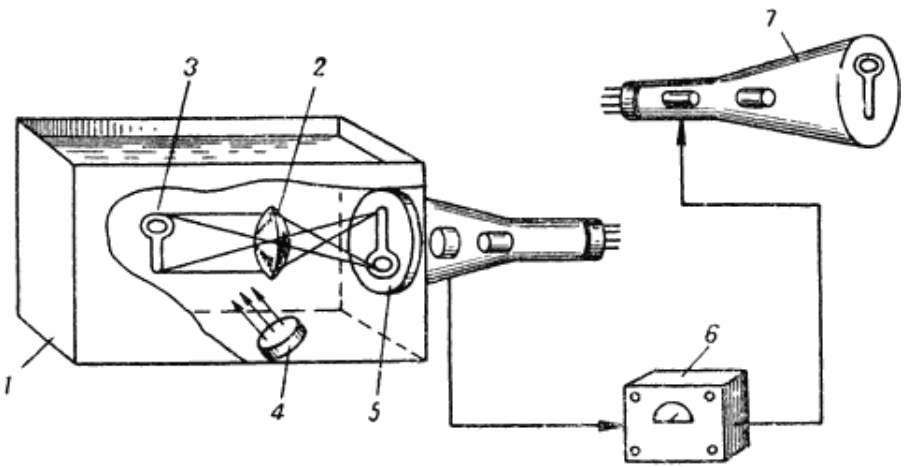


Рис. 46. Ультразвуковой микроскоп:

1 — сосуд с непрозрачной жидкостью; 2 — линза, фокусирующая ультразвук; 3 — рассматриваемый предмет; 4 — излучатель ультразвука; 5 — электронно-акустический преобразователь с кварцевой мозаикой; 6 — усилитель; 7 — телевизионная трубка

Работу ультразвукового микроскопа можно объяснить следующим образом. Предмет, изображение которого мы хотим увеличить, помещен в сосуд с непрозрачной жидкостью (рис. 46).

На него направлен пучок ультразвуковых волн, излучаемый пьезокварцевой пластинкой. Отраженные от предмета ультразвуковые волны фокусируются линзой и попадают на пьезокварцевую мозаику, составленную из множества приемников звука. Ультразвуковое изображение заставляет колебаться те приемники, которые попадают в зону изображения, причем интенсивность этих колебаний определяется интенсивностью соответствующей части изображения. Под воздействием этих колебаний на приемниках появятся электрические заряды.

Так акустическое изображение превращается в электрическое. Превратить же электрическое изображение в оптическое — задача телевидения.

По аналогии с обычным телевидением прибор, воспринимающий звуковое изображение и преобразующий его в электрическое, назвали ультразвуковым иконоскопом. Такой прибор впервые предложил советский ученый С. Я. Соколов. В настоящее время разработано несколько конструкций ультразвуковых иконоскопов, или, иначе, электронно-акустических преобразователей. Один из них показан на рис. 47.

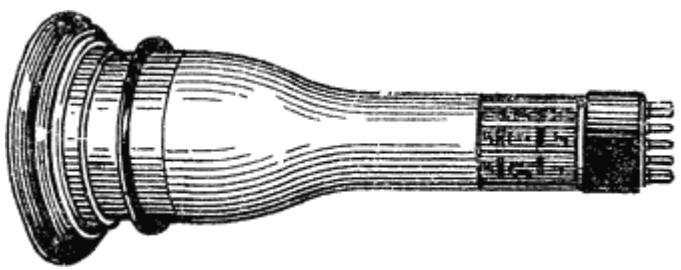


Рис. 47. Внешний вид электронно-акустического преобразователя

При помощи ультразвукового микроскопа можно добиться увеличения изображения в сотни и даже тысячи раз. Качество изображения зависит от частоты ультразвука. Чем короче длина волны, тем больше разрешающая способность микроскопа, т. е. тем подробнее мы сможем рассмотреть увеличенное изображение.

Однако ультразвуковая микроскопия делает лишь первые шаги, не выходя из стадии лабораторных исследований. Но есть все основания надеяться, что этот метод будет быстро развиваться и совершенствоваться.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Все готово к старту космической ракеты. Проверены все приборы, двигатели. Космонавт занимает свое место. Еще мгновение — и ракета устремляется ввысь.

Несмотря на необычные условия, космонавт чувствует себя хорошо. Исправно работает и вся бортовая аппаратура космического корабля. Полет ракеты успешно продолжается.

Каким образом это стало известно нам, находящимся на Земле, от которой ракета удаляется на тысячи километров? Ведь для того чтобы знать состояние бортовой аппаратуры и тем более человека, необходимы многочисленные сведения о температуре, давлении, скорости, ускорении и т. д.

Оказывается, все эти сведения можно получить при помощи приборов, называемых датчиками. Это они собрали интересующие нас данные и преобразовали их в электрические сигналы, которые при помощи радиопередатчика были переданы на Землю. В результате расшифровки и обработки полученных данных мы знаем о состоянии космонавта и можем судить о работе разнообразных приборов, находящихся на космическом корабле.

Датчики применяются не только в космонавтике. Существуют многочисленные отрасли науки, техники и военного дела, где эти приборы крайне необходимы.

В многочисленном семействе датчиков почетное место занимают пьезоэлектрические датчики, использующие пьезоэлектрический эффект. Наиболее распространены пьезоэлектрические *датчики давления.*

Простейший манометр, например манометр для измерения давления пара в паровом котле, представляет собой изогнутую стеклянную трубку, наполненную жидкостью. Одно из колен трубки соединено с котлом. При повышении давления в котле пар давит на жидкость и в этом колене уровень жидкости падает, а в свободном колене повышается. Величина давления определяется по разности уровней жидкости в коленах.

Существуют и другие, более совершенные виды датчиков давления — манометры. Но все они имеют существенные недостатки: нельзя измерять как очень большие, так и очень слабые давления, а главное — они не успевают отмечать изменения при быстрых отклонениях давления. К тому же показания таких манометров очень трудно, а иногда и совсем невозможно передать на расстояние.

Этих недостатков не имеют пьезоэлектрические манометры,

где чувствительным элементом является пьезокварцевая пластинка, на которую воздействует измеряемое давление. На пластинке возникают электрические заряды, величина которых пропорциональна давлению. Заряды с поверхностей пластинки снимаются и подаются на усилитель и далее на электроизмерительный прибор. Устройство пьезоэлектрического манометра для измерения давления пара в котле схематично изображено на рис. 48.

Нетрудно видеть, как выгодно отличается такой манометр от стеклянного манометра с жидкостью. Здесь может быть измерено малейшее изменение давления, поскольку самое ничтожное количество электрических зарядов может быть усилено.

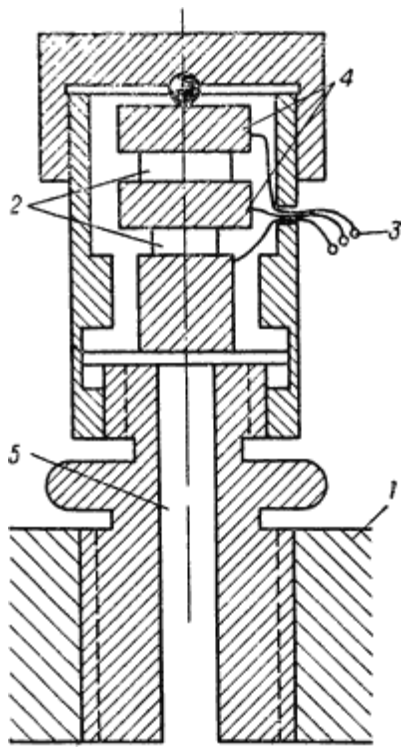


Рис. 48. ***Пьезоэлектрический манометр:***

1 — корпус котла; 2 — кварцевые пластинки, 3 — выводы; 4 — электроды. 5 — отверстие для доступа пара

При помощи пьезоэлектрического манометра измеряют давление и на расстоянии. Для этого манометр устанавливают на

исследуемом объекте и при помощи проводов соединяют с усилителем, находящимся на месте наблюдения. В случае необходимости электрические сигналы с усилителя могут быть преобразованы в радиосигналы и переданы на значительные расстояния!.

Пьезоэлектрические манометры удобны в обращении, прочны и невелики по размерам.

Все эти свойства обусловили широкое применение пьезоэлектрических датчиков давления в науке и технике. При помощи таких датчиков на железнодорожном транспорте измеряют давление, которое оказывает на рельсы проходящий поезд. Разработаны и широко применяются пьезокварцевые датчики для исследования рабочего процесса в двигателях внутреннего сгорания, в паровых и газовых турбинах, атомных реакторах.

Применяются пьезоэлектрические манометры и в военном деле. При изучении полета артиллерийского снаряда необходимо знать его поведение внутри ствола орудия в момент выстрела. Для этого в ствол монтируется пьезоэлектрический датчик давления, показания которого раскрывают процесс выстрела (рис. 49).

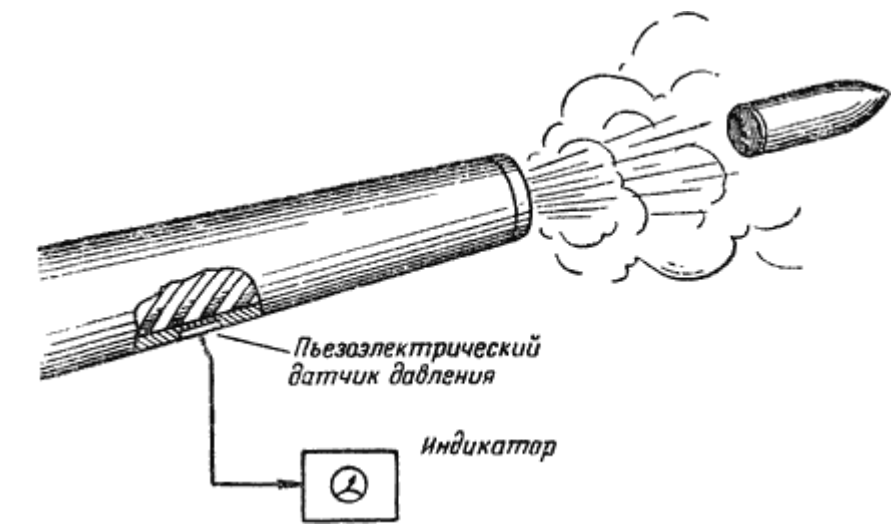


***Рис. 49.** При помощи пьезоэлектрического датчика давления можно «заглянуть» в ствол артиллерийского орудия в момент выстрела*

Необходимы пьезоэлектрические манометры и для определения силы ударной волны при испытательных взрывах

зарядов взрывчатых веществ. В этом случае пьезоэлектрические датчики устанавливают на различных расстояниях от центра взрыва. Величины давлений, измеренные датчиками, будут характеризовать силу ударной волны и ее изменение с увеличением расстояния.

Среди пьезоэлектрических датчиков можно найти и пьезоэлектрический *акселерометр* — прибор для измерения ускорений. Сила инерции зависит от массы тела. Если тело движется, то сила инерции зависит и от ускорения, т. е. прироста скорости за единицу времени. Чем больше масса и ускорение тела, тем больше сила инерции. Если каким-либо образом измерить силу инерции, то, зная массу тела, можно определить ускорение.

Этот принцип и положен в основу устройства пьезоэлектрического акселерометра (рис. 50), В камере акселерометра на пружинах подвешен груз. Одна из пружин прикрепляется к электроду пьезокварцевой пластинки. Движение корпуса вызывает смещение груза, а следовательно, и давление на кварцевую пластинку. Величина электрических зарядов, возникающих на пластинке, пропорциональна смещению груза, а следовательно, и ускорению.

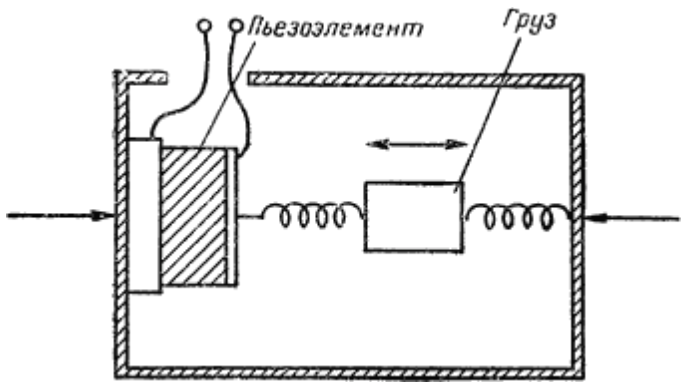


Рис. 50. ***Схема пьезоэлектрического измерителя ускорений — акселерометра***

Пьезоэлектрическими акселерометрами можно измерять не только ускорения, но и вибрацию. Знать, как вибрируют те или иные детали и приборы при движении самолета, ракеты, корабля, очень важно. Дело в том, что при определенных условиях вибрация может достигнуть значительного размаха, и в результате прибор или деталь выйдут из строя.

Чтобы измерить частоту и размах вибрации, на исследуемый

прибор устанавливают акселерометр. Под влиянием вибрации груз периодически сдавливает и растягивает кварцевую пластинку. В цепи пластинки возбуждается переменный ток, величина и частота которого пропорциональны вибрации.

Колебания пластинки можно записать на ленту, используя самопишущее устройство, подобное тому, которое применяется в ультразвуковом эхолоте. Такой прибор называется *акселерографом*. При высокой частоте вибрации эти колебания можно просмотреть на экране электронно-лучевой трубки.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВО В МЕДИЦИНЕ

Казалось бы, как далека медицина от радиоэлектроники! Но сейчас все больше и больше радиоэлектронных приборов поступает на службу делу укрепления **и** сохранения здоровья человека. Среди них почетное место занимают и пьезоэлектрические приборы.

Волноводный щуп — металлический стержень, колебания которого передаются пьезоэлектрическому приемнику, с успехом применяется в качестве хирургического зонда. Колебания, возникающие при исследовании глубокого ранения, прослушиваются при помощи телефонов и позволяют судить о характере ранения.

Разработаны различные хирургические инструменты, оборудованные чувствительными пьезоэлектрическими устройствами. Например, пьезоэлектрический нож по характеру звука, слышимого в телефонах, дает возможность хирургу судить о том, какую ткань организма он разрезает.

В последнее время получили распространение пьезоэлектрические приборы для так называемой безножевой хирургии. Эти приборы создают ультразвуковые колебания такой высокой интенсивности, что с их помощью можно поражать участки живой ткани без нарушения соседних участков. На рис. 51 изображен кварцевый фокусирующий излучатель, применяемый для этих целей. Излучатель состоит из четырех кварцевых фокусирующих пластин, создающих ультразвуковые пучки очень высокой интенсивности.

Для лечения зубов созданы ультразвуковые бормашины. Зубная эмаль хорошо обрабатывается ультразвуком, причем менее болезненно, чем обычной бормашиной.

Существуют пьезоэлектрические приборы, позволяющие устанавливать диагноз заболеваний. При помощи ультразвуковых колебаний можно, например, исследовать бьющееся сердце и определить характер его заболевания. Применив высокие частоты и тонкие ультразвуковые лучи, можно даже проследить за колебаниями отдельных участков сердца.

В последнее время методы ультразвукового просвечивания живых тканей стали дополнять широко распространенные методы рентгенографии. Эти методы с успехом применяются в животноводстве для определения степени упитанности животных. Были предприняты успешные попытки использовать метод

ультразвукового просвечивания злокачественных опухолей. Полученные результаты позволяют надеяться, что при помощи этого метода можно будет устанавливать наличие злокачественных опухолей на ранних стадиях их развития.

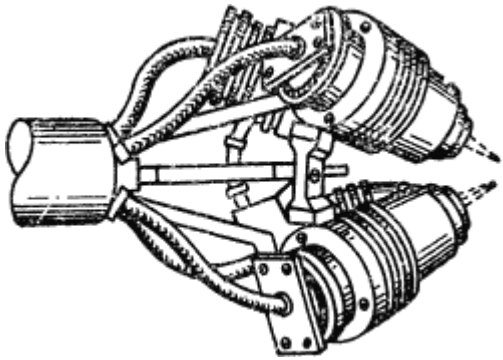


Рис. 51. ***Счетверенный кварцевый фокусирующий излучатель для безножевой хирургии***

Нашли применение в медицине и методы ультразвуковой локации. Созданы, например, миниатюрные локаторы, позволяющие слепому ориентироваться относительно окружающих его предметов. Этот прибор состоит из ультразвукового излучателя и смонтированного вместе с ним ультразвукового пьезоэлектрического приемника. Батареи питания помещаются на поясе или в кармане, а излучатель и приемник человек держит в руке. Эхосигналы, отраженные от предметов, на которые направляется ультразвуковой луч, прослушиваются в телефонах. Таким способом слепой может обнаружить предметы, находящиеся на расстоянии до 10 метров.

НОВЫЕ УСПЕХИ

В нашем рассказе мы коснулись лишь немногих примеров практического применения пьезоэлектрических явлений. Но и они позволяют судить о том, какое большое влияние оказало пьезоэлектричество на развитие науки и техники, как это физическое явление помогло решить разнообразные актуальные задачи.

На этом можно было бы и закончить знакомство с пьезоэлектричеством. Но наш рассказ будет неполным, если мы не сообщим о некоторых новых областях применения и о будущем пьезоэлектрической техники.

Большие успехи достигнуты в разработке приборов, использующих пьезоэлектрический эффект в радиоэлектронике. Помимо многочисленных генераторов, стабилизаторов, преобразователей, фильтров, в настоящее время, по данным зарубежной печати, успешно разрабатываются пьезоэлектрические трансформаторы напряжений.

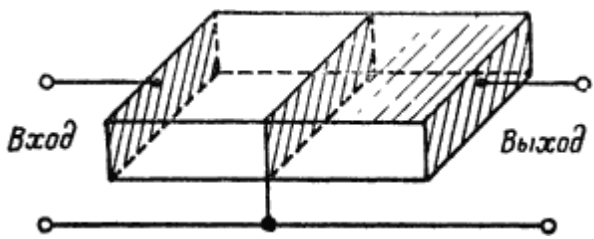


Рис. 52. Пьезоэлектрический трансформатор напряжения

Трансформатор напряжения — устройство, позволяющее повысить или понизить подводимое к нему электрическое напряжение. Обычные трансформаторы напряжений — довольно тяжелые и громоздкие приборы, размеры которых растут по мере повышения рабочего напряжения.

Пьезоэлектрический трансформатор напряжения лишен этих недостатков. Он состоит из двух стержней с разными пьезоэлектрическими свойствами (рис. 52). На электроды одного из них (входного) подается переменное электрическое напряжение. Механические колебания, возникающие в этом стержне, передаются выходному стержню. Поскольку пьезоэлектрические свойства стержней различны, то снимаемое с

выходного стержня напряжение будет отличаться от подводимого. Обычно требуется повышать подводимое напряжение. Поэтому выходной стержень изготовляют из материала, обладающего значительным пьезоэлектрическим эффектом.

Еще большее усиление у так называемых гибридных трансформаторов. Здесь в качестве входного устройства используют магнитострикционный сердечник с обмоткой, на которую подается входное напряжение. Выходным устройством является пьезоэлектрический стержень с двумя электродами (рис. 53). Входное напряжение вызывает магнитострикционные колебания сердечника, которые передаются стержню. Такие трансформаторы могут обеспечить усиление подводимого напряжения в несколько сот раз.

Особенно велики успехи пьезоэлектричества в технических отраслях, связанных с использованием ультразвука. Здесь пьезоэлектричество применяется на каждом шагу. Без него не обойтись в излучателях и приемниках ультразвука, в фокусирующих линзах, в фильтрах и стабилизаторах частоты.

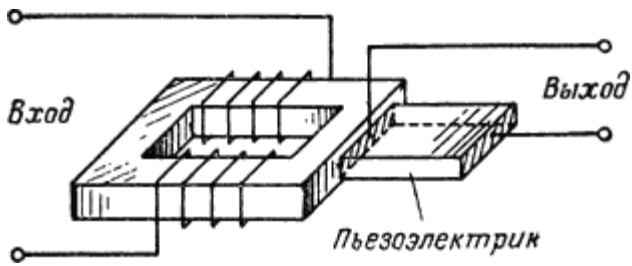


Рис. 53. Гибридный трансформатор напряжения

Области применения пьезоэлектричества продолжают расширяться. Помимо гидролокаторов и эхолотов, пьезоэлектрические приборы стали применяться и в других устройствах. В частности, пьезоэлектрические акселерометры являются основной частью инерциальной навигационной системы, устанавливаемой на подводных лодках зарубежных флотов. Считается, что такая система обеспечивает самую высокую точность определения места корабля в море. Система надежна в работе, не подвержена влияниям магнитных бурь, метеорологических условий и маневрирования корабля.

Работа такой инерциальной системы основана на измерении ускорений подводной лодки в трех направлениях при помощи акселерометров, которые установлены на строго

стабилизированной в горизонтальной плоскости платформе. Измеренные акселерометрами ускорения поступают в специальные счетно-решающие приборы, которые определяют истинную скорость корабля, его координаты и отклонение от курса, вызванное ветром, течением, ударами волн.

Расширяется применение пьезоэлектрических датчиков. Современная космонавтика поставила перед учеными важнейшую задачу — изучить движение микрометеоров в космическом пространстве. Встреча космического корабля с микрометеором даже и небольшого размера грозит, неприятными последствиями. Но сведения о движении микрометеоров в космическом пространстве до самого последнего времени отсутствовали. Эту задачу успешно решили запуски спутников и космических ракет с установленными на них пьезоэлектрическими приемниками.

Сигналы, зарегистрированные приемниками, при помощи специальной аппаратуры передавались на Землю. Так было установлено, что метеорная опасность для космического корабля невелика. Пьезоэлектрические датчики, таким образом, способствовали успешному запуску и полету первых космических кораблей с человеком на борту, осуществленным в Советском Союзе.

Наряду с изысканием новых областей применения пьезоэлектричества в науке и технике идут поиски новых пьезоэлектриков. И это понятно. Ведь с каждым годом потребность в пьезоэлектрических приборах растет. Новые грандиозные задачи, поставленные перед наукой и техникой, требуют и новых пьезоэлектрических материалов, превосходящих по своим свойствам кварц, сегнетову соль и даже титанат бария.

Несмотря на свои положительные свойства, титанат бария обладает и недостатками. Это прежде всего то, что он при работе нагревается. Достаточно сказать, что коэффициент полезного действия излучателя из титаната бария составляет около 50 %, а это означает, что почти половина подводимой к излучателю энергии обращается в тепло. При сильном нагревании (80–90°) титанат бария теряет свои пьезоэлектрические свойства. Все это ограничивает его применение в излучателях. Поэтому в последнее время ведутся работы по созданию пьезокерамики по типу титаната бария, но с меньшими температурными потерями. Создание искусственных синтетических пьезоэлектрических материалов открывает новые возможности в этом направлении.

Большие успехи достигнуты в технологии производства пьезоэлектриков, в конструировании пьезоэлектрической аппаратуры. Однако и здесь стоят новые задачи, требующие напряженного творческого труда многих работников науки,

техники и производства.

Однако и те успехи, которые достигнуты современной пьезоэлектрической техникой, открывают большие перспективы. В недалеком будущем пьезоэлектрические приборы займут почетное место среди радиоэлектронного оборудования космических межзвездных кораблей.

При помощи сверхчувствительных пьезоприемников, установленных на ракетах, будет исследовано космическое пространство на многие тысячи километров от Земли. Пьезоэлектрическими ультразвуковыми излучателями и приемниками возможно будут снабжены и первые автоматические ракеты, которые совершат посадку на Луне, Венере, Марсе и других планетах. Благодаря этим приборам люди впервые узнают условия жизни на этих планетах, исследуют атмосферу и поверхность планет.

На Земле чувствительные пьезоэлектрические установки помогут исследовать глубины недр, не прибегая к обычным геологическим методам.

При помощи ультразвуковых приборов будут открыты новые месторождения угля, железной руды, цветных металлов. Пьезоэлектрические приборы помогут совершить и далекое подземное путешествие. Они будут глазами подземного корабля будущего, предназначенного для путешествия и исследования глубинных недр Земли. Большое применение в будущем найдут пьезоэлектрические приборы в медицине, металлургии, химической промышленности и других отраслях народного хозяйства.